

珠江口盆地两类凹陷构造-沉积演化差异 对油气富集条件与规律的影响^{*}

杨 俊¹ 孔令文¹ 李胜利² 朱茂林¹ 姚 威¹
朱增民² 包 静² 梁世友¹

1 中国石化石油勘探开发研究院, 无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

2 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

摘 要 珠江口盆地为典型新生代陆缘裂谷盆地, 其油气资源主要来源于始新统文昌组湖相烃源岩。以中央隆起为界, 该盆地南北 2 大区域分别发育断陷型凹陷与拆离型凹陷。这 2 类凹陷中的油气分布存在显著差异, 但差异原因尚不明确。采用构造演化解析、沉积体系重建及源-断-砂配置分析等方法, 揭示了盆地“先断后拆、北断南拆”的构造演化规律与“早陆晚海、北洲南扇”的沉积分布特征。2 类凹陷的构造-沉积演化过程不同形成了不同的源-断-砂配置, 致使它们具有迥异的油气成藏模式与富集规律。断陷型凹陷常具有“湖相优质烃源—高陡断层—近物源砂体”配置, 以富油成藏模式为主; 而拆离型凹陷多形成“湖相优质烃源—断块掀斜调整断层—远物源砂体”配置, 以富气成藏模式为主, 也可局部富油。断陷型凹陷油气多富集于陡坡带—凹中隆—缓坡内带, 而拆离型凹陷更易富集于缓坡带, 这为后续勘探部署提供了方向。

关键词 断陷型凹陷 拆离型凹陷 构造-沉积演化 源-断-砂配置 成藏模式 新生代 珠江口盆地

第一作者简介 杨俊, 男, 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 从事油气地质综合评价研究。E-mail: yangjun2010.syky@sinopec.com。

通讯作者简介 李胜利, 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 从事油气储层地质研究。E-mail: slli@cugb.edu.cn。

中图分类号: P542 文献标志码: A

Impacts of tectono-sedimentary evolution differences on petroleum accumulation conditions and patterns between two types of depressions in the Pearl River Mouth Basin

YANG Jun¹ KONG Lingwen¹ LI Shengli² ZHU Maolin¹ YAO Wei¹
ZHU Zengmin² BAO Jing² LIANG Shiyu¹

1 Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Jiangsu Wuxi 214126, China

2 School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract The Pearl River Mouth Basin, a typical Cenozoic continental margin rift basin, derives

^{*} 中国石化科技部项目“南海北部重点盆地油气成藏条件与勘探方向”(编号: P24180)与国家科技重大专项(编号: 2025ZD1400800)联合资助。[Co-funded by the Sinopec Science and Technology Department Project “Oil and Gas Accumulation Conditions and Exploration Direction in Key Basins in the Northern South China Sea” (No. P24180) and the National Science and Technology Key Project of China (No. 2025ZD1400800)]

收稿日期: 2026-01-14 改回日期: 2026-02-27

its major hydrocarbon resources from the lacustrine source rocks of the Wenchang Formation in the Eocene. Divided by the central uplift, faulted and detached depressions have developed respectively in the northern and southern parts of the basin. There are significant differences in hydrocarbon distribution, and the causes of these differences remain unclear. In this study, technical methods including structural evolution analysis, sedimentary system reconstruction, and source-fault-sandbody association analysis were employed. It reveals the basin's structural evolution law of "faulting first then detaching, faulting in the north and detachment in the south" and the sedimentary evolution characteristics of "terrestrial environment in the early stage and marine environment in the late stage, deltas in the north and fan deposits (fan delta, sublacustrine fan or submarine fans) in the south". The different tectonic sedimentary evolution processes of the two types of depressions formed source-fault-sandbody associations, resulting in different petroleum accumulation patterns and enrichment laws. Differential source-fault-sandbody associations and petroleum accumulation patterns were established separately. Characterized by high quality lacustrine source rocks, steep faults and sandbodies near sediment provenance, faulted depressions were apt to generate oil-rich accumulation pattern. But for detached depressions featured by high quality lacustrine source rocks, fault block tilting adjusted faults and sandbodies far away from sediment provenance, gas-rich accumulation pattern with locally oil-rich was predominating. The study points out that hydrocarbons in faulted sags are enriched in the steep slope zone, uplifts in the depression-center and inner gentle slope zone, while those in detachment depressions are enriched in the gentle slope zone. This provides constructive suggestions for petroleum exploration.

Key words faulted depressions, detached depressions, tectono-sedimentary evolution, source-fault-sandbody association, petroleum accumulation forming pattern, Cenozoic, Pearl River Mouth Basin

About the first author YANG Jun, born in 1982, is a master and senior engineer. He is engaged in comprehensive evaluation research of petroleum geology. E-mail: yangjun2010.syky@sinopec.com

About the corresponding author LI Shengli, born in 1971, is a professor and director of Ph.D.. He is engaged in hydrocarbon reservoir geology. E-mail: slli@cugb.edu.cn.

0 引言

从全球构造域与盆地类型分布角度来看,南海北部陆缘 4 个盆地(珠江口盆地、琼东南盆地、北部湾盆地及莺歌海盆地)处于欧亚、印度—澳大利亚及太平洋 3 大板块的交汇地带(朱伟林等, 2015),总体为新生代弧后盆地(窦立荣和温志新, 2021),它们是华南板块向南海扩张过渡的构造响应产物,总体上具有东早西晚渐进式裂陷特征(张功成等, 2025)。珠江口盆地位于南海北部陆缘的东北部,为典型陆缘裂谷盆地(庞雄等, 2021),是南海北部地区唯一的既富油又富气盆地。珠江口盆地内部各凹陷油气富集特征差异较大,目前已证实了一些富油气凹陷,如惠州、陆丰、恩平、文昌 A、文昌 B、白云等凹陷,但仍然有许多潜在富烃凹陷亟待进行油气评价。而在勘探阶段的选凹评价中,凹陷结构特征、构造-沉积演

化及油气成藏差异是重要的考量因素。

以盆地的中央隆起为界,受陡倾正断层与拆离(正)断层控制(谢玉洪, 2024),珠江口盆地的南北不同构造带发育 2 种不同类型的凹陷,其中持续断陷型(简称断陷型)凹陷在北部区域占主导,而南部区域以早断晚拆型(简称拆离型)凹陷为主(图 1)。其中主控拆离断裂是一种大型低角度正断层,常表现为水平方向具有较大位移,并常伴随变质核杂岩的形成与演化(高阳东等, 2023a),其局部形状可表现为铲式,但铲式断层不是拆离断层的同义词。大型拆离断层主要发育在南海北部陆缘盆地的深水区,拆离作用的横向强度不均衡和纵向幕式不均匀控制了深水区断凹/坳群的形成(谢玉洪, 2024)。

虽然拆离型凹陷在珠江口盆地总体表现出“内(北部)油外(南部)气”的油气分布格局

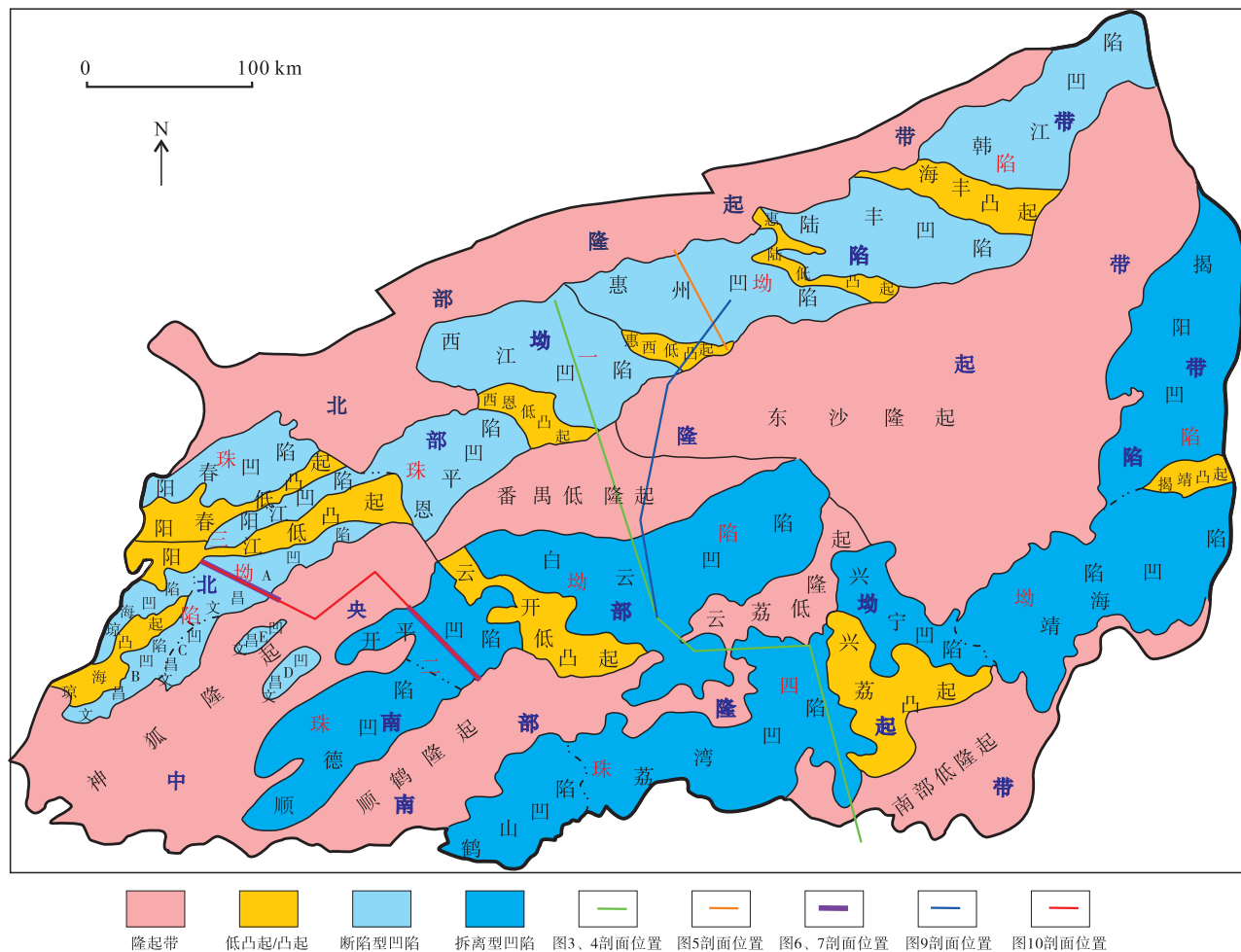


图 1 珠江口盆地构造单元与 2 类凹陷分布图

Fig. 1 Distribution map of tectonic units and the two types of depression

(邓运华, 2009), 但随着勘探进程的深入, 油气分布格局也出现了一些新变化, 尤其是在珠江口盆地中带、外带的开平凹陷 (高阳东等, 2023a)、顺德凹陷 (吴克强等, 2024) 陆续发现一些规模油藏。同时, 随着近年来对构造拆离作用认识的逐渐深化 (窦立荣和温志新, 2021; 吴克强等, 2023; 徐长贵等, 2024), 人们对南海北部盆地不同凹陷结构导致的沉积充填与油气富集差异也越来越关注, 这对南海北部陆缘盆地, 尤其是珠江口盆地潜在富烃凹陷评价与勘探选区具有重要意义。通过对比珠江口盆地南北 2 大区域中 2 大类典型凹陷的构造-沉积演化差异, 探讨了该盆地不同结构凹陷的湖相烃源岩、断裂体系及优势储集层沉积相的分布差异, 建立了相应的油气成藏模式, 并分析了油气富集规律差异, 为后续珠江口盆地油气勘探选区提供方向。

1 区域构造-沉积背景

珠江口盆地新生代主要经历了 6 幕构造运动, 从早到晚分别为神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动及东沙运动, 沉积环境经历了从河湖相、海陆过渡相到海相的转变 (图 2)。受神狐运动影响, 盆地从古新世开始裂陷, 形成了少量孤立性地堑或半地堑, 但神狐组 (地震反射界面 T100 与 T90 之间) 的沉积范围比较局限, 以河流—湖泊沉积为主 (徐万兴等, 2023; 吴克强等, 2024)。

珠琼运动一幕时期, 珠江口盆地进入主断陷期 (图 2), 形成了大量半地堑与地堑, 以中央隆起带为界, 盆地北部坳陷, 即珠一坳陷、珠三坳陷内部均为陡倾正断层控制的凹陷; 而南部坳陷, 即珠二坳陷、珠四坳陷内部主要为拆离断层控制的凹陷

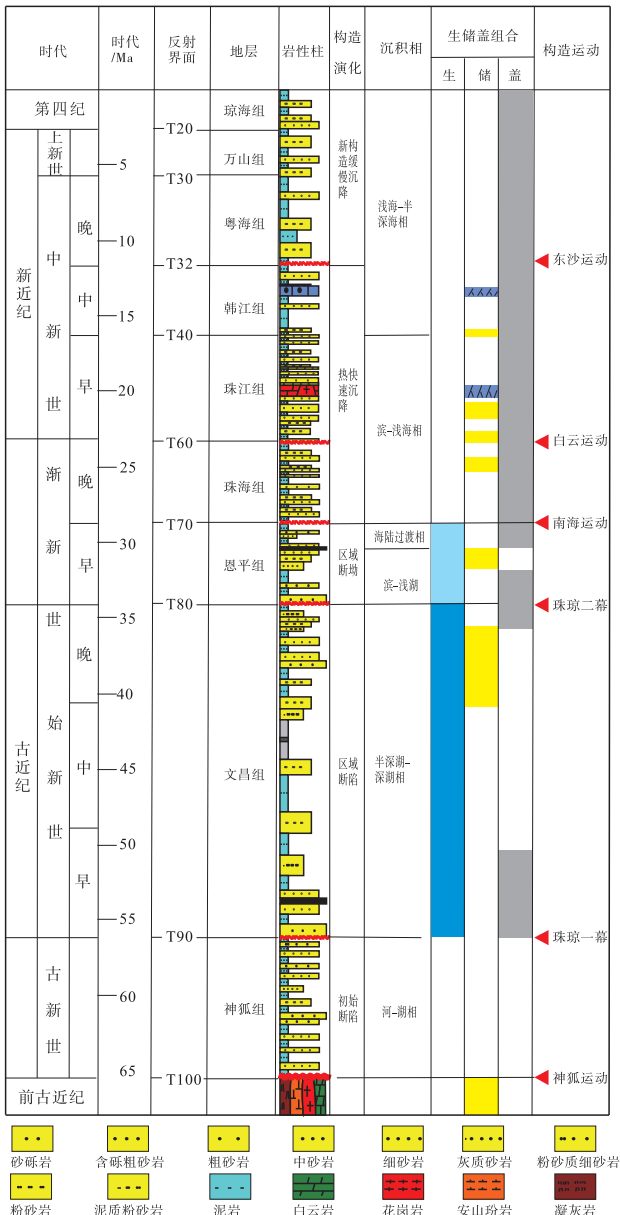


图 2 珠江口盆地的地层单元与构造-沉积演化阶段综合图 (据朱明等, 2019; 高阳东等, 2023b; 吴克强等, 2024; 有修改)
Fig. 2 Stratigraphic column with tectonic sedimentary evolution stages of the Pearl River Mouth Basin (modified from Zhu *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2023b; Wu *et al.*, 2024)

(图 1), 具有典型的北断南拆的凹陷结构特征 (谢玉洪, 2024)。尤其是在珠琼运动一幕晚期, 盆地南部受拆离作用的影响, 开始形成白云、荔湾等大型拆离型凹陷 (庞雄等, 2018; 李洪博等, 2020; 彭光荣等, 2024)。湖泊沉积范围不断扩大, 在控凹断裂一侧, 文昌组 (地震反射界面 T90 与 T80 之间) 明显增厚 (图 3; 图 4)。该时期是断陷

湖泊盆地形成的主要时期, 也是文昌组湖相主力烃源岩形成的关键时期。

珠琼运动二幕时期, 盆地从主断陷期向断一拗转换期发展, 开始逐渐进入海陆过渡环境 (图 2)。伸展作用加强、地壳薄化, 控凹断裂深切到韧性流变层, 形成伸展拆离面 (图 3), 早期窄陡的半地堑演变为由拆离断层控制的宽缓凹陷 (陶文芳等, 2023), 拆离作用使得陡坡变缓, 渐新世 (地震反射界面 T80 与 T70 之间) 浅湖湖沼与海陆过渡环境含煤系地层成为南海北部陆缘盆地的第 2 套重要烃源层 (朱明等, 2019; 侯读杰等, 2024)。

南海运动时, 珠江口盆地开始向热快速沉降阶段发展 (图 2), 裂陷与拆离作用已逐渐减弱 (图 3), 海侵已开始逐渐扩大, 北部以海相三角洲与滨浅海为主, 而南部珠四坳陷区已进入半深海—深海环境 (朱明等, 2019)。而从白云运动开始后, 盆地全面进入热沉降拗陷阶段, 海侵作用加强, 陆架一坡折位置向盆地北部迁移, 盆地全面进入海相环境, 到东沙运动时, 全盆进入浅海—半深海环境 (图 2)。

2 2 类凹陷构造-沉积演化差异

南海北部陆缘区浅水与深水区成盆机理不同, 尤其是拆离断层的强度不均衡 (谢玉洪, 2024), 是造成珠江口盆地南、北 2 大区域凹陷结构与构造演化存在差异的关键; 而构造演化的差异、由南向北逐渐海侵的海陆变迁过程 (郑金云等, 2022) 及沉积物源的差异是造成珠江口盆地南北 2 大区域不同结构凹陷沉积充填与演化差异的主要原因。

2.1 典型断陷型凹陷的构造-沉积演化规律

珠江口盆地北部区域凹陷受高陡断裂控制, 发育以地堑和半地堑为代表的断陷型凹陷群 (图 1)。以珠一坳陷中的惠州凹陷 (图 5) 与珠三坳陷中的文昌 A 凹陷 (图 6) 为例, 在断陷期 (文昌组沉积期) -断拗期 (恩平组沉积期), 惠州凹陷东南侧靠近东沙隆部位陡坡带 (图 5-a) 与文昌 A 凹陷东南侧靠近神狐隆起部位 (图 6-a), 高陡产状的同生断裂极为发育, 且垂向断距大, 文昌组 (图 5-a; 图 6-a) -恩平组 (图 5-b; 图 6-b) 沉积期洼陷中心与半深湖—深湖均位于高陡断层一侧, 并持续发育受高陡断裂控制的近物源扇三角洲; 而西北侧

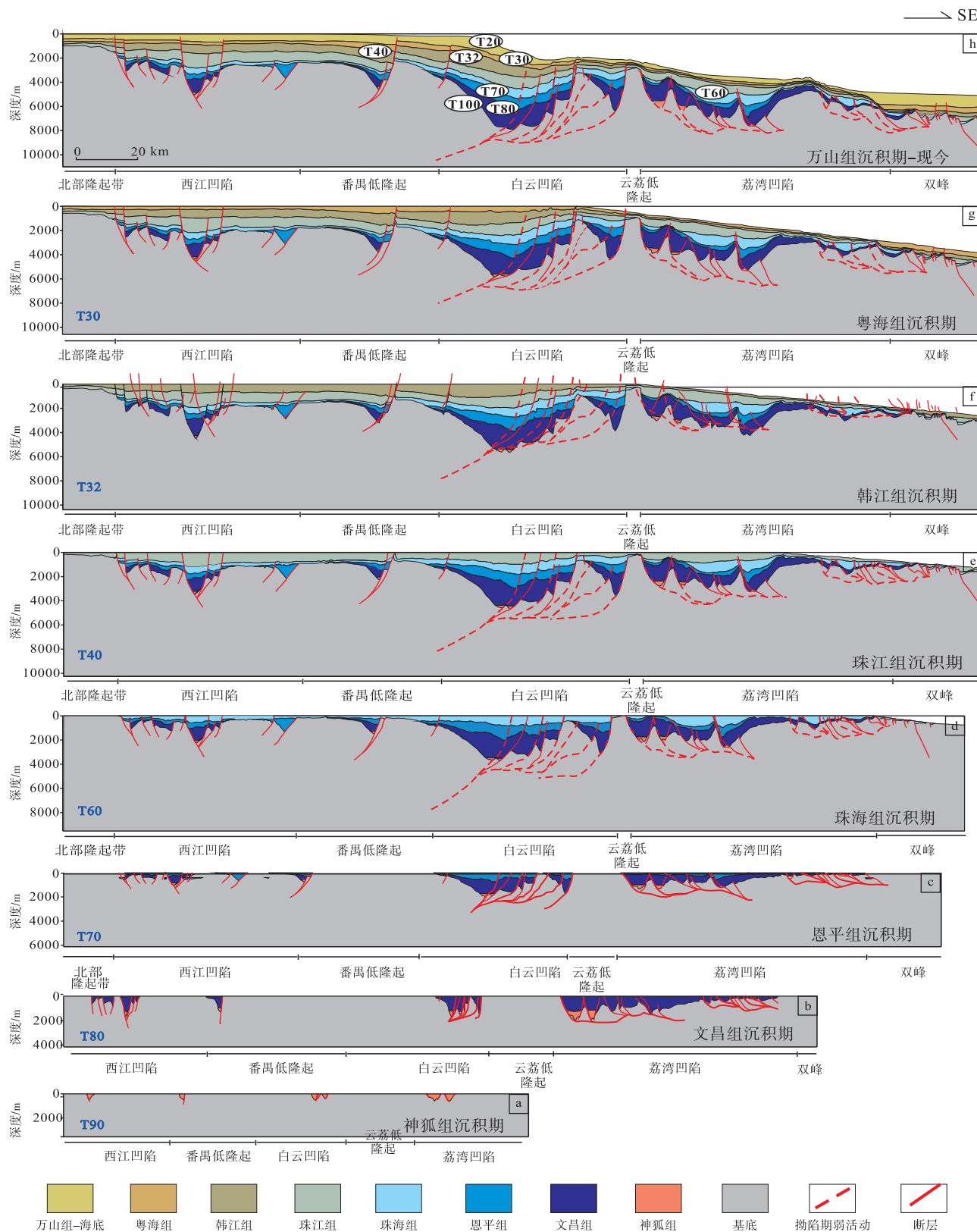


图 3 珠江口盆地构造演化剖面
Fig. 3 Tectonic evolution profiles of the Pearl River Mouth Basin

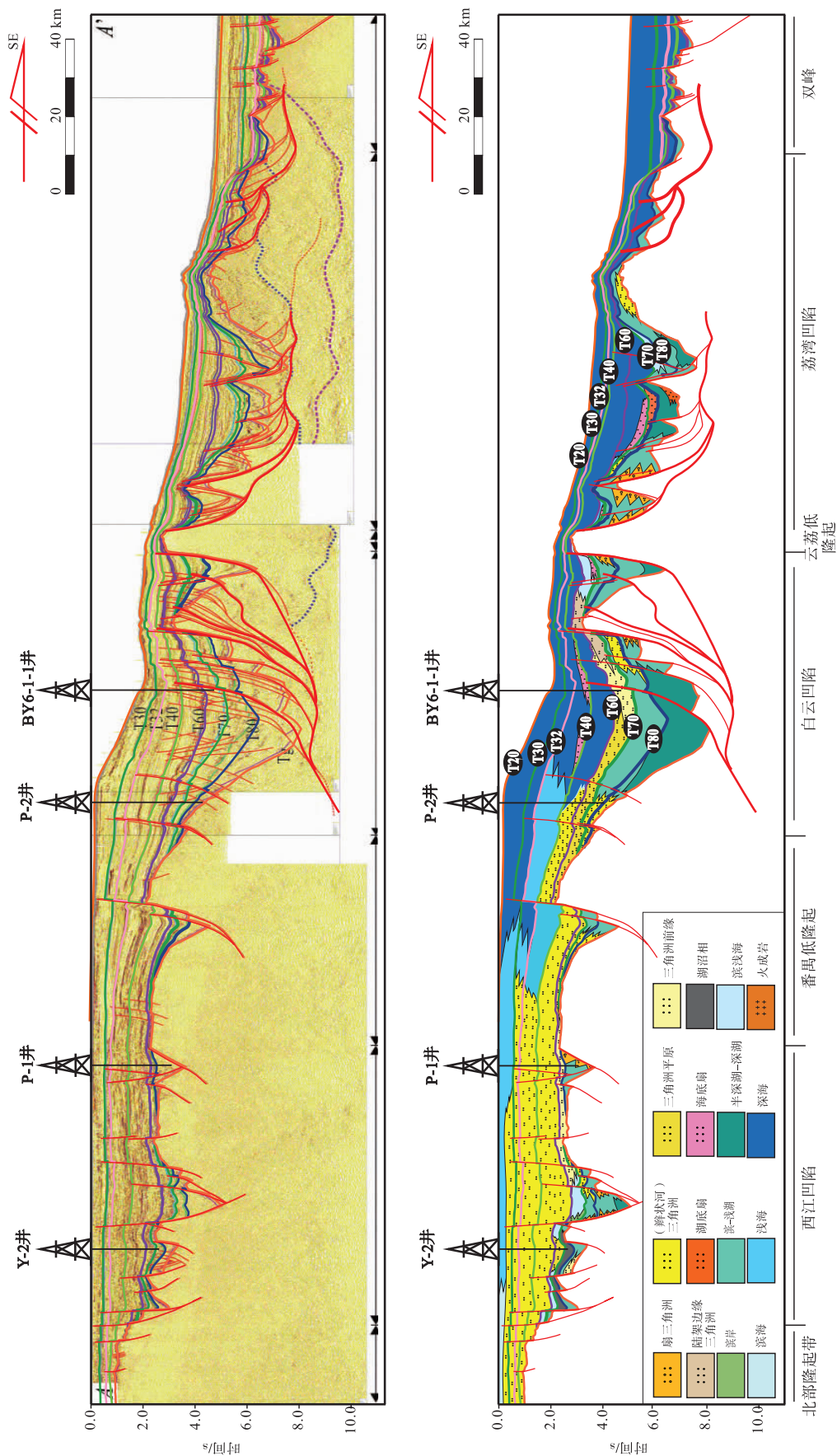


图 4 珠江口盆地地震—地质—沉积学格架剖面
Fig. 4 Seismic geological sedimentological framework profile of the Pearl River Mouth Basin

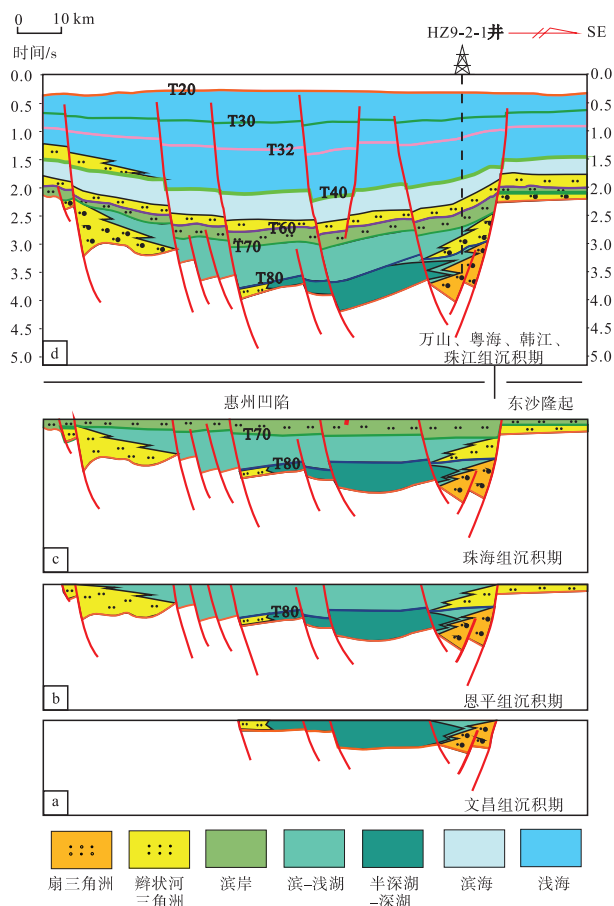


图 5 惠州凹陷构造-沉积演化模式

Fig. 5 Tectono-sedimentary evolution patterns of Huizhou sag

缓坡带高陡产状的同生断裂相对于陡坡带欠发育，垂向断距相比陡坡明显要小，持续发育辫状河三角洲；洼陷带同生大断距正断层也较发育，湖泊面积持续发育显著增大，深湖相沉积逐渐消退，表现出从“小湖深盆”向“大湖浅盆”的沉积演化特征，但湖盆中心总体变化不大(图 5-a, 5-b; 图 6-a, 6-b)。

珠海组沉积期(图 2)，断裂构造活动明显减弱，断层断距也明显较小(图 5-c; 图 6-c)，以拗陷沉降作用为主，湖盆消退，开始大规模海侵(图 5-c; 图 6-c)，受差异海侵与古珠江三角洲物源供给的影响，惠州凹陷广泛发育滨岸沉积(图 5-c)，而文昌 A 凹陷辫状河三角洲沉积十分发育(图 6-c)。珠江组沉积期及以后(图 2)，区域热沉降占主导，珠江组沉积期断层有较弱的活动性，然后迅速减弱甚至不太发育，受古珠江三角洲的影响，三角洲较为发育(图 5-d; 图 6-d)；而珠江组沉积以后，由于广泛且持续的海侵，滨浅海

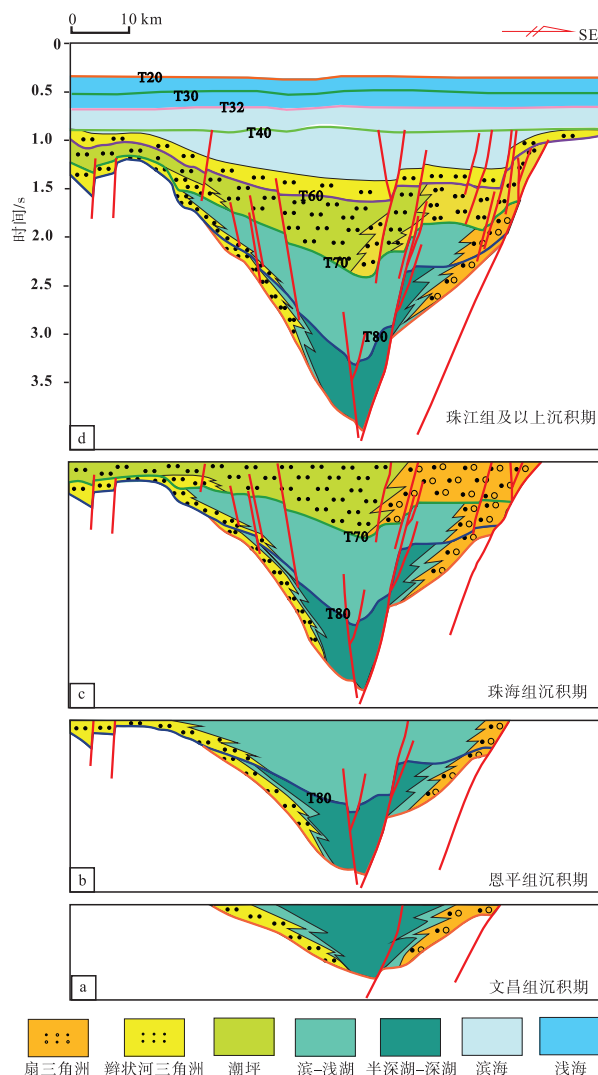


图 6 文昌 A 凹陷构造-沉积演化模式

Fig. 6 Tectono-sedimentary evolution patterns of Wenchang A sag

相沉积逐渐成为主导(图 5-d; 图 6-d)。

值得注意的是，虽然珠一坳陷与珠三坳陷内部凹陷均以断陷型为主，但 2 个坳陷区中的内部凹陷规模明显不同，珠一坳陷中的 5 个凹陷南北向的拉张比珠三坳陷中的凹陷更明显(图 1)，珠一坳陷中的凹陷表现为更明显的“宽而深”特点(图 1; 图 5)；而珠三坳陷中的凹陷表现为更明显的“窄而深”特征。以珠一坳陷中的惠州凹陷(图 5)与珠三坳陷中的文昌 A 凹陷(图 6)为例，2 个凹陷规模存在明显差异，导致这种差异的原因是与它们进入渐新世后的构造变动差异有关，其中珠三坳陷进入渐新世后，具有走滑运动的特征(张功成等，2016)，使断层持续高陡且发生东西向走滑，使内

部凹陷呈现东西走向特征，而南北向的扩张不如珠一坳陷明显，这是导致珠一坳陷内部凹陷的湖相更发育的一个重要原因(图 1；图 5；图 6)。

2.2 典型拆离型凹陷的构造-沉积演化规律

拆离型凹陷受大型低缓拆离断裂控制，在珠江口盆地南部区域十分发育(图 1)，在断陷成湖的早期(神狐组与文昌组沉积早期)受裂陷作用控制，而后期(文昌组沉积晚期与恩平组沉积期)受核杂岩拆离作用约束，具有明显的“先断后拆”的裂陷构造演化过程(图 3)。

半深湖—深湖沉积受核杂岩上涌与拆离作用控制，从凹陷中心区向斜坡区域迁移，呈现“早洼晚坡”分布的特点。以珠二坳陷开平凹陷为例，从其沉积充填演化过程可以看出(图 7)，文昌组下段(文下段)沉积期，凹陷中心主要受高陡断裂控制形成单个小而深的洼陷，主要发育半深湖—深湖相沉积，陡坡带发育近源的扇三角洲，而缓坡带发育远源辫状河三角洲(图 7-a)。

而在文昌组上段(文上段)沉积期(图 7-b)，湖盆范围因拆离作用随之扩大，湖水变浅，主要发育滨—浅湖相沉积。与文下段相比，文上段沉积期，开平凹陷形态和沉积体系发生了巨大变化。陡坡带受拆离作用和岩浆上拱的共同影响，裂陷期高陡控凹断裂转变为超宽铲式低缓断层，沉积体系从扇三角洲向(辫状河)三角洲转变，并向洼槽带长距离推进。在文上段沉积期，深凹带文下段的半深湖—深湖相沉积由于受拆离作用的影响，逐渐变形迁移至缓坡带，同时文上段滨—浅湖相沉积在深凹带十分发育，同时两侧斜坡部位也有一定分布；而缓坡带持续为(辫状河)三角洲沉积，但发育规模、展布范围明显大于文下段。

进入恩平组沉积期(图 7-c)，受岩浆上拱作用持续影响，形成多个次洼。拆离作用进一步将早期的深湖相沉积拆移至缓坡的更远位置，在这一时期凹陷受物源供给作用增强，形成广泛分布的三角洲沉积。珠海组沉积期(图 7-d)，海侵作用增强，凹陷逐渐由三角洲平原—前缘过渡相沉积向海相沉积转变。在珠江组沉积期及以后，全部转为浅海—深海沉积环境(图 7-e)。

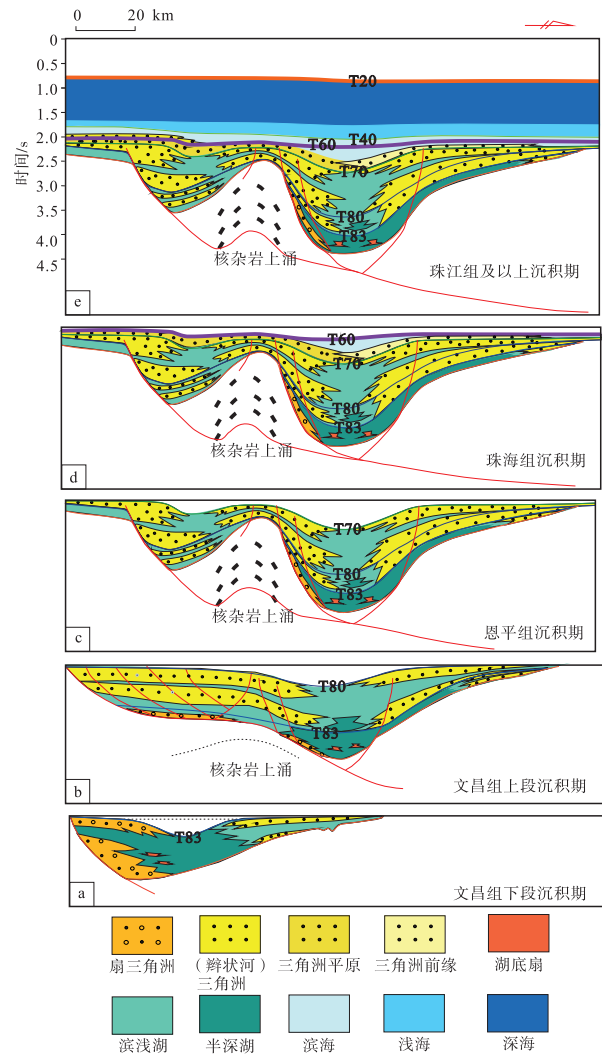


图 7 开平凹陷构造-沉积演化模式

Fig. 7 Tectono-sedimentary evolution patterns of Kaiping sag

2.3 2 类凹陷构造-沉积演化差异

2.3.1 断陷期构造-沉积差异

从珠江口盆地总体构造-沉积演化过程(图 3-a)可以发现，珠江口盆地古新世(神狐组沉积期)开始张裂，南部坳陷与北部坳陷均开裂，但断陷深度(几百米左右)较浅，而内部凹陷的横向规模(2~8 km)均较小，且南部坳陷横向规模明显大于北部坳陷。由于断陷规模较小，沉积环境以相对较浅水的河湖相为主(吴克强等，2024)。

而从区域断陷期(文昌组沉积期)开始，构造演化表现出明显的“先断后拆、北断南拆”的特征(图 3-b, 3-c)。从始新世开始进入强烈拉伸，南部坳陷和北部坳陷中的凹陷均深及 2 km 以下，强烈断陷作用也使内部凹陷横向扩张明显，但

南部拗陷中的凹陷横向扩张明显比北部拗陷中的凹陷规模要大。这是由于该时期,南部拗陷伴随了深及基底的拆离作用,大型拆离断层的拆离作用十分明显,导致南部拗陷中的凹陷(如白云凹陷、荔湾凹陷)横向迅速扩张而使其规模变大;而北部拗陷中的凹陷拆离作用并不明显,使它们垂向断陷很深,但横向扩张不如南部拗陷(图 3-b)。这一时期伴随强烈断陷,湖泊迅速扩张,中半深湖—深湖迅速扩大,但南部拗陷的内部凹陷中的半深湖—深湖范围与埋深比北部拗陷中的凹陷明显要大(图 4)。

2.3.2 断拗转换期构造-沉积差异

进入断拗转换期(渐新世早期恩平组沉积期),南、北 2 大区域的断陷作用均开始减弱,但南部拗陷区的拆离作用仍较活跃,这造成了 2 大区域凹陷连片的规模差异进一步加大(图 1),典型如南部的白云凹陷、荔湾凹陷的连片规模明显比北部的西江凹陷要大(图 3-c)。

在断陷转换期,湖泊范围也随之进一步扩大,但湖泊水体逐渐开始变浅,全区总体滨浅湖占主导,半深湖与深湖相对不够发育。与此同时,南部区域由于海侵已开始逐渐进入海陆过渡环境(图 4)。这一时期的区域性海侵,是早渐新世(珠江口盆地恩平组与琼东南盆地崖城组沉积期)南海北部陆缘区海陆过渡环境大型浅水辫状三角洲与煤系地层发育的关键时期,仅以白云凹陷北坡为例,单期三角洲面积近 5000 km^2 (谢玉洪, 2024)。

2.3.3 拗陷/热沉降期构造-沉积差异

渐新世晚期(珠海组),珠江口盆地开始进入快速热沉降期(图 2),此时期断裂活动迅速减弱,尤其是南部拗陷中的拆离作用已经很不明显或不太活跃了(图 3-d)。珠江口盆地北部(地震反射界面 T70 与 T60 之间)滨浅海背景下的古珠江大型海相三角洲沉积体系成为主导(图 4);而盆地南部由于海侵的影响,出现陆架—坡折控制下的半深海—深海相沉积体系,辫状河三角洲转变为海底扇沉积(图 4)。

白云运动早期的早中新世(珠江组沉积期)由于海侵的影响,盆地已开始全面进入海相沉积环境(图 2)。在这一时期北部地区滨浅海沉积占主导,古珠江三角洲依旧广泛发育;南部地区整体进

入半深海—深海环境,地层开始表现出“北厚南薄”的特征(图 3-e),并在古隆起区周缘发育碳酸盐岩礁与滩沉积(黄诚等, 2011)。而白云运动晚期(韩江组沉积期),受海侵与古珠江三角洲明显退积的影响,南部区域地层减薄更明显(图 3-f),海相浊积沉积体系也逐渐成为主要储集层(图 4)。东沙运动后,南海北部陆缘盆地全面进入新构造缓慢沉降阶段(图 2),由于持续海侵与沉积物源的萎缩,珠江口盆地大部分区域进入半深海—深海环境,“北厚南薄”的地层分布特征更为明显(图 3-g, 3-h),古珠江三角洲消退(图 4),礁滩基本消亡(于兴河等, 2016)。

总的来看,在这种断—拆—拗的构造转换背景下,断陷期与断拗转换期的沉积地层总体表现为“北薄南厚”的特征(图 3-a 至 3-d);而在中新世进入拗陷期之后,表现为典型“北厚南薄”的特征,沉积体系总体表现出“早陆晚海、北洲(三角洲)南扇(海底扇)”的沉积演化规律(图 4)。

3 油气富集条件与规律差异

珠江口盆地“早陆晚海”的沉积背景控制了断陷期湖相烃源岩、断—拗转换期海陆过渡相烃源岩和拗陷期海相烃源岩分布(谢玉洪, 2024)。其中断陷期的湖相烃源岩是该盆地最重要的油气来源(高阳东等, 2023b; 吴克强等, 2024),而 2 类结构凹陷不同的构造—沉积演化过程恰恰是造成油气成藏条件和成藏规律差异的关键因素,集中表现在烃源岩规模、优势储集层、断裂体系、油气成藏与富集规律方面的差异性。

3.1 湖相烃源岩分布特征差异

文昌组湖相烃源岩是珠江口盆地最主要的烃源岩,对盆地油气成藏起着至关重要的作用。珠江口盆地这套湖相烃源岩在南、北 2 大区域的 2 大类凹陷中的形成与分布特征存在差异。断陷型凹陷的陡坡带快速沉降形成深洼槽,缓坡带相对稳定,以惠州凹陷(图 5)与文昌 A 凹陷(图 6)为例,沉降中心长期偏向控凹/洼边界断层一侧,在裂陷期长期维持封闭—半封闭环境,这种构造背景使深凹/洼区长期处于欠补偿缺氧状态,而扇三角洲等粗碎屑与沉积陆源有机物质能够快速沉积,这为浮游低等生物(藻类)和细菌等有机质富集与保存提供

了理想场所，从而易形成优质湖相烃源岩；同时，也易形成烃源岩与储集层垂向紧密相邻、叠置的有利源储配置。

在断陷型凹陷的缓坡带通常沉积物源较远，常发育三角洲、湖泊滩沙坝或滨浅海砂岩及碳酸盐岩台地等储集体，碎屑物质缓慢输入有机物质，常形成较差或一般质量湖相烃源岩。因此，断陷型凹陷的半深湖—深湖相优质烃源岩主要分布在靠近高陡断层的深洼带。需要注意的是，虽然珠一坳陷、珠三坳陷中均以发育断陷型凹陷为主，但各凹陷结构也明显存在差异性，珠一坳陷断裂的南北向拉张作用更强烈，因此珠一坳陷中的各凹陷总体表现出“宽而深”的特征，以惠州凹陷为例，在断陷期湖相沉积为“宽而厚”的分布特征(图 5)；而珠三坳陷中的各凹陷总体表现出“窄而深”的特点，以文昌 A 凹陷为例，在断陷期湖相沉积为“窄而厚”的分布规律(图 6)。

拆离型凹陷受拆离作用影响，深部低角度拆离

断层(通常倾角 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间)进一步驱动上盘烃源岩层向缓坡与凸起带大规模水平位移，形成宽深断—拆结构，也为大型三角洲—湖相沉积体系提供了巨大可容纳空间，促使深洼区长期维持封闭—半封闭缺氧环境，利于藻类有机质富集与保存。另一方面深部滑脱作用驱动上盘岩层大规模水平位移，并产生垂向差异沉降，形成宽缓的不对称碟状凹陷结构，在上盘发育多米诺式旋转断块或滚动背斜，导致沉降中心向拆离带根部(上盘后端)迁移，形成深凹/洼槽，并可把烃源岩推移至缓坡带与凸起带。因此，拆离型凹陷的半深湖—深湖相优质烃源岩主要分布在洼槽—缓坡带，表现出“厚而宽”的特点(图 7；图 8)。同时，拆离型凹陷受核杂岩上涌、地壳拆离薄化作用的影响，形成高热流环境(张迎朝等，2014；范彩伟等，2022)，使生烃门限变浅，可促使烃源岩快速、高强度生烃，从而增大有效烃源岩面积和资源潜力。

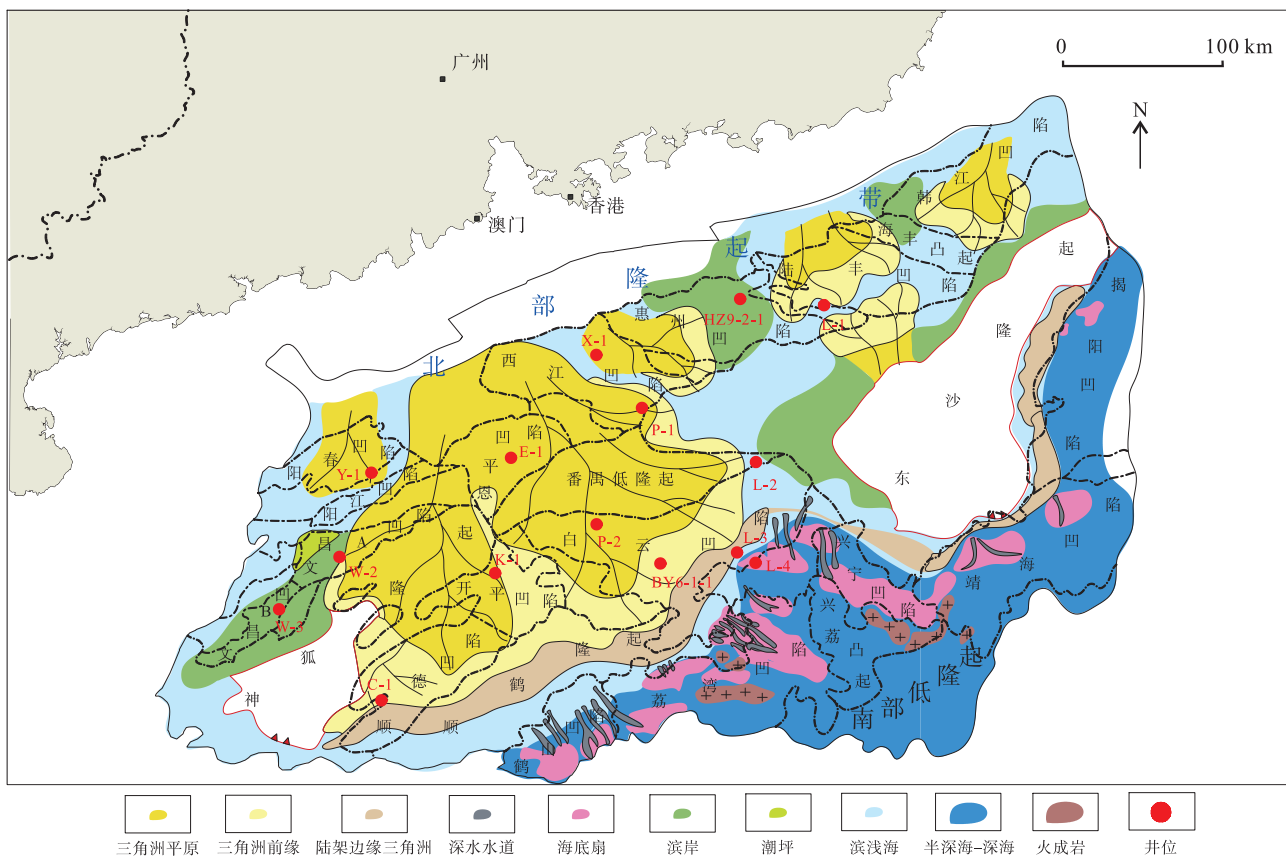


图 8 珠江口盆地上新统(珠海组)沉积相(据朱明等, 2019; 有修改)

Fig. 8 Sedimentary facies of the Upper Oligocene (Zhuhai Formation) in Pearl River Mouth Basin
(modified from Zhu *et al.*, 2019)

3.2 储集层优势沉积相的差异

珠江口盆地断陷期,在断陷型凹陷的陡坡带,近源扇三角洲十分发育,而缓坡带易发育(辫状河)三角洲(图 5;图 6)。拆离型凹陷陡坡带表现为“早扇(扇三角洲)晚辫(辫状河三角洲)”的特点,而缓坡带(辫状河)三角洲相对更发育(图 7)。拗陷期主力储集层为珠江组—珠海组的砂岩,沉积物源主要来自盆地北部大型河流—三角洲。由于拗陷期海侵方向自南向北且规模逐渐增大,沉积物向南逐渐变细,因此北部浅水区的断陷型凹陷大型三角洲砂体更为发育,储集层条件优越;而南部拆离凹陷的储集层相对不够发育(图 4;图 7),但在海侵初始时期的珠海组沉积期(图 8),在开平凹陷、白云凹陷北部缓坡带发育大规模三角洲前缘砂体,而盆地的南部洼槽带—南部陡坡带发育海底扇(侯读杰等,2024)。

3.3 断裂对成藏区带影响的差异

断陷型凹陷由于高陡断裂极为发育且持续活动,既为半深湖—深湖相烃源岩提供了形成场所,也使高陡断裂就近沟通优质烃源岩,油气在此类凹陷的陡坡带及相邻深洼槽区或洼中隆起区的垂向运移效率高,同时持续活动的高陡断裂在陡坡一侧易形成多级同生断块,利于陡坡带油气成藏(如图 9 中的惠州 26 洼与图 10 中的文昌 A 凹陷)。而拆离型凹陷控凹断层呈“勺状—铲式”,由早期高角度正断层经拆离作用和岩浆上拱形成,拆离面以上依然发育大量次级高陡断裂,与优质烃源岩分布耦合,洼槽—缓坡带具备更良好的源—输配置条件(如图 9 中的白云凹陷与图 10 中的开平凹陷);同时,拆离型凹陷缓坡带易形成掀斜断块构造,源储匹配与断裂沟通利于缓坡带油气成藏。

另外,断陷期与断拗转换期,珠一坳陷断裂的南北向拉张作用更明显;而珠三坳陷在渐新世断拗转期与拗陷期,断裂还具有较明显的走滑特征(张功成等,2016),这一方面导致珠一坳陷、珠三坳陷中的凹陷规模差异较大,另一方面也使断裂在不同凹陷中的油气运聚作用方面存在差异。

3.4 油气成藏与富集规律差异

中国近海盆地总体油气成藏表现出典型的“内油外气”(邓运华,2009)、“下气上油”分布

规律,这种油气分布特征在珠江口盆地内带珠一坳陷与外带珠二坳陷十分明显(朱伟林等,2015),这显然与烃源岩类型、成熟度情况有关。而典型断陷型凹陷与拆离型凹陷在源—断—砂配置方面存在差异,既证实了这一总体油气成藏与分布的规律,又揭示出了油气成藏的复杂性,尤其是盆地中—东部与西部油气分布规律存在差异性。珠江口盆地中—东部的惠州凹陷(断陷型)—白云凹陷(拆离型)油气成藏表现出明显的“内油外气”特征(图 9);而在盆地西部的文昌 A 凹陷—开平凹陷,这一规律并不明显,而表现出“内外皆富油”的特征(图 10)。

但断陷型凹陷在高陡断裂陡坡带油气优势富集与此类凹陷的“湖相优质烃源—高陡断层—近物源砂体”的配置相关性明显,在陡坡带—凹中隆—缓坡内带油气优势富集且更易富集油;而拆离型凹陷在缓坡带油气优势富集则与此类凹陷“拆离重组式”的“湖相优质烃源—断块掀斜调整断层—远物源砂体”的配置相关性明显(图 9;图 10),在缓坡带油气优势富集且更利于气的富集,在盆地埋深较浅的断陷层也存在富油区域。

需注意的是,盆地南部典型拆离型凹陷,如开平凹陷(高阳东等,2023b)、顺德凹陷(吴克强等,2024)陆续发现油藏,南部盆地外带也展现出局部富油的特征,证实拆离型凹陷独具特色的源—断—砂配置特点导致其油气成藏模式另具特色。以开平凹陷为例(图 10),拆离断层使优质湖相烃源岩并没有迅速深埋而生油并通过缓坡断块掀斜调整断层运聚成藏(杨海长等,2023),但这一规律在白云凹陷并不适用(图 9),究其原因白云凹陷拆离作用更早、更深、更明显,烃源岩以生气为主(米立军等,2022)。

综上,由于珠江口盆地南北区域凹陷类型差异,导致它们的构造—沉积演化过程存在不同,因而其油气成藏与富集规律存在差异。因此,油气勘探部署需考虑这些差异,在盆地北部的断陷型凹陷,主要在陡坡带—凹中隆—缓坡内带进行油气勘探。在勘探层位上,在浅层(珠江组及韩江组)找油为主,以浅水大型三角洲为主要勘探目标;在深层(珠海组、恩平组及文昌组)找气为主,主要勘探目标侧重近物源的扇三角洲与辫状河三角洲。而南部的拆离凹陷总体应聚焦缓坡带,并以找



图 9 惠州凹陷与白云凹陷油气成藏模式对比图

Fig. 9 Hydrocarbon cross section indicates differences of the petroleum accumulation pattern between Huizhou sag and Baiyun sag

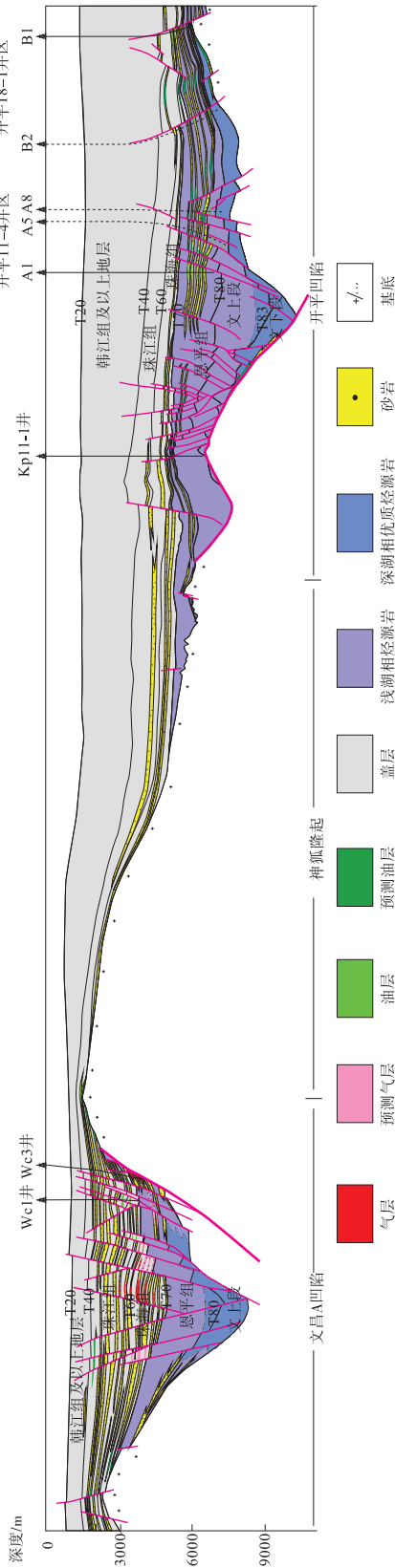


图 10 文昌 A 凹陷与开平凹陷油气成藏模式对比图

Fig. 10 Hydrocarbon cross section indicates differences of the petroleum accumulation pattern between Wenchang A sag and Kaiping sag

气为主,但盆地西部的拆离凹陷埋深较浅的断陷层—断拗层也要重视油藏的勘探,主要勘探层位应为文昌组、恩平组、珠海组,勘探目标以三角洲及深水重力流砂体为主。

4 结论

1) 珠江口盆地为新生代陆缘裂谷盆地,构造演化表现出明显的“先断后拆、北断南拆”的规律,北部区域多为断陷型凹陷,南部区域主要为拆离型凹陷,在断—拆—拗转换背景下,沉积体系表现出“早陆晚海、北洲南扇”的总体沉积演化规律。

2) 断陷型凹陷的凹陷中心与半深湖—深湖沉积均位于高陡断层一侧;拆离型凹陷常表现出高陡断裂转变为超宽铲式拆离型断层的特征,其构造—沉积早期受裂陷作用控制,晚期受拆离作用约束,具有明显的“先断后拆”、半深湖—深湖沉积逐渐向缓坡迁移的特点。

3) 断陷型凹陷具有“湖相优质烃源—高陡断层—近物源砂体”的配置,陡坡带及周缘更易富集油气,且更利于富集油;而拆离型凹陷在缓坡带油气优势富集则与此类凹陷“湖相优质烃源—断块掀斜调整断层—远物源砂体”的配置相关性明显且更利于富集气。油气勘探选区选层时,应充分考虑 2 种凹陷构造—沉积演化导致的油气成藏富集区带差异。

参考文献 (References)

- 邓运华. 2009. 试论中国近海两个拗陷带油气地质差异性. 石油学报, 30(1): 1-8. [Deng Y H. 2009. Analysis on differences of petroleum type and geological conditions between two depression belts in China offshore. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 1-8]
- 窦立荣, 温志新. 2021. 从原型盆地叠加演化过程讨论沉积盆地分类及含油气性. 石油勘探与开发, 48(6): 1100-1113. [Dou L R, Wen Z X. 2021. Classification and exploration potential of sedimentary basins based on the superposition and evolution process of prototype basins. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1100-1113]
- 范彩伟, 李明, 李才, 陈林, 李伟. 2022. 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. 中国海上油气, 34(5): 36-45. [Fan C W, Li M, Li C, Chen L, Li W. 2022. Characteristics of fault transfer zone in southwest Wenchang A sag, Pearl River Mouth Basin and its role in hydrocarbon accumulation. *China Offshore Oil and Gas*, 34(5): 36-45]
- 高阳东, 彭光荣, 陈兆明, 于水明, 高中亮, 姜大鹏. 2023a. 珠江口盆地开平凹陷油气地质新认识与勘探突破. 中国海上油气, 35(1): 1-13. [Gao Y D, Peng G R, Chen Z M, Yu S M, Gao Z L, Jiang D P. 2023a. New understanding and exploration breakthrough of petroleum geology in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 35(1): 1-13]
- 高阳东, 彭光荣, 陈兆明, 姜大鹏, 马宁, 李潇, 吕华星, 高中亮. 2023b. 珠江口盆地开平凹陷深水古近系勘探重大发现及意义. 石油学报, 44(7): 1029-1040. [Gao Y D, Peng G R, Chen Z M, Jiang D P, Ma N, Li X, Lü H X, Gao Z L. 2023b. Breakthrough and significance of deep-water Paleogene exploration in Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(7): 1029-1040]
- 侯读杰, 吴克强, 尤丽, 张自鸣, 李雅君, 熊小峰, 徐敏, 严夏泽, 陈威合, 程熊. 2024. 琼东南盆地陆缘海相烃源岩有机质富集机理. 石油与天然气地质, 45(1): 31-43. [Hou D J, Wu K Q, You L, Zhang Z M, Li Y J, Xiong X F, Xu M, Yan X Z, Chen W H, Cheng X. 2024. Organic matter enrichment mechanisms of terrigenous marine source rocks in the Qiongdongnan Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(1): 31-43]
- 黄诚, 傅恒, 汪瑞良. 2011. 珠江口盆地(东部)新近系珠江组碳酸盐岩沉积相及沉积模式. 海洋地质前沿, 29(9): 18-25. [Huang C, Fu H, Wang R L. 2011. Sedimentary facies and depositional model of the Neogene Zhujiang Formation in the Pearl River Basin (east). *Marine Geology Frontiers*, 29(9): 18-25]
- 李洪博, 郑金云, 庞雄, 任建业, 李瑞彪. 2020. 南海北部陆缘差异拆离作用结构样式与控制因素: 以珠江口盆地白云—荔湾深水区为例. 中国海上油气, 32(4): 24-35. [Li H B, Zheng J Y, Pang X, Ren J Y, Li R B. 2020. Structural patterns and controlling factors of differential detachment in the northern continental margin of the South China Sea: taking Baiyun-Liwan deep water area in the Pearl River Mouth Basin as an example. *China Offshore Oil and Gas*, 32(4): 24-35]
- 米立军, 周守为, 谢玉洪, 张功成, 杨海长. 2022. 南海北部深水区油气勘探进展与未来展望. 中国工程科学, 24(3): 58-65. [Mi L J, Zhou S W, Xie Y H, Zhang G C, Yang H Z. 2022. Deep-water oil and gas exploration in northern South China Sea: progress and outlook. *Strategic Study of CAE*, 24(3): 58-65]
- 庞雄, 任建业, 郑金云, 刘军, 于鹏, 柳保军. 2018. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征: 以南海北部陆缘深水区白云凹陷为例. 石油勘探与开发, 45(1): 27-39. [Pang X, Ren J Y, Zheng J Y, Liu J, Yu P, Liu B J. 2018. Petroleum geology controlled by extensive detachment thinning of continental margin crust: a case study of Baiyun sag in the deep-water area of northern South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 27-39]
- 庞雄, 郑金云, 梅廉夫, 柳保军, 张忠涛, 吴哲, 冯轩. 2021. 先存俯冲陆缘背景下南海北部陆缘断陷特征及成因. 石油勘探与开发, 48(5): 1069-1080. [Pang X, Zheng J Y, Mei L F, Liu B J, Zhang Z T, Wu Z, Feng X. 2021. Characteristics and origin of continental marginal fault depressions under the background of preexisting subduction continental margin, northern South China Sea, China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(5): 1069-1080]

- 彭光荣, 张丽丽, 许新明, 何金海, 姜大朋, 叶青. 2024. 珠江口盆地开平凹陷核杂岩拆离结构及其动力学成因. 地球科学, 49(9): 3306-3317. [Peng G R, Zhang L L, Xu X M, He J H, Jiang D P, Ye Q. 2024. Core complex and detachment structure in the Kaiping sag, Pearl River Mouth Basin and a discussion on the dynamics. Earth Science, 49(9): 3306-3317]
- 陶文芳, 李洪博, 郑金云, 张青林, 李元平, 贾兆扬, 董明. 2023. 南海北部陆缘超深水珠四坳陷地质结构及其对烃源岩发育的控制. 海洋地质前沿, 39(1): 40-48. [Tao W F, Li H B, Zheng J Y, Zhang Q L, Li Y P, Jia Z Y, Dong M. 2023. Geological structure of Zhusi Depression in ultra-deep water area on the continental margin of the northern South China Sea and its control on the development of source rocks. Marine Geology Frontiers, 39(1): 40-48]
- 吴克强, 解习农, 裴健翔, 任建业, 尤丽, 姜涛, 权永彬. 2023. 超伸展陆缘盆地深部结构及油气勘探意义: 以琼东南盆地为例. 石油与天然气地质, 44(3): 651-661. [Wu K Q, Xie X N, Pei J X, Ren J Y, You L, Jiang T, Quan Y B. 2023. Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: a case study of Qiongdongnan Basin. Oil & Gas Geology, 44(3): 651-661]
- 吴克强, 尤丽, 龚宇, 庾雷, 高梦天, 窦婧瑛, 向远高, 李珊珊, 郑飞. 2024. 珠江口盆地顺德凹陷深水古近系石油勘探突破及其意义. 石油学报, 45(9): 1336-1348. [Wu K Q, You L, Gong Y, Tuo L, Gao M T, Dou J Y, Xiang Y G, Li S S, Zheng F. 2024. Petroleum exploration breakthrough of Paleogene deep-water strata in Shunde sag of Pearl River Mouth Basin and its significance. Acta Petrolei Sinica, 45(9): 1336-1348]
- 谢玉洪. 2024. 南海北部陆缘盆地深水油气勘探新认识及攻关方向. 天然气工业, 44(1): 13-25, 201. [Xie Y H. 2024. New insights and future research focuses on oil and gas exploration in the continental margin deepwater area of the northern South China Sea. Natural Gas Industry, 44(1): 13-25, 201]
- 徐长贵, 高阳东, 刘军, 彭光荣, 陈兆明, 李洪博, 蔡俊杰, 马庆佑. 2024. 南海陆缘“拆离-核杂岩型”盆地发现与油气地质条件: 以南海北部开平凹陷为例. 地学前缘, 31(6): 381-404. [Xu C G, Gao Y D, Liu J, Peng G R, Chen Z M, Li H B, Cai J J, Ma Q Y. 2024. Discovery of “detachment-core complex type” basins offshore the northern South China Sea and their oil and gas geological conditions: a case study of the Kaiping sag in the northern South China Sea. Earth Science Frontiers, 31(6): 381-404]
- 徐万兴, 何卫军, 陈奎, 刘芳, 罗威. 2023. 珠江口盆地西部珠三坳陷古近系物源体系及沉积充填演化特征. 海洋地质与第四纪地质, 43(2): 145-159. [Xu W X, He W J, Chen K, Liu F, Luo W. 2023. Provenance system evolutions and sedimentary filling characteristics of the Paleogene in Zhu III Depression, the western Pearl River Mouth Basin. Marine Geology & Quaternary Geology, 43(2): 145-159]
- 杨海长, 曾清波, 纪沫, 郭帅, 孙瑞, 郝建荣, 王龙, 王禹诺, 张功成. 2023. 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. 石油学报, 44(6): 933-947. [Yang H Z, Zeng Q B, Ji M, Guo S, Sun R, Hao J R, Wang L, Wang Y N, Zhang G C. 2023. Accumulation conditions and exploration direction of crude oil in detachment rift of Kaiping sag in deep water area of Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 44(6): 933-947]
- 于兴河, 李胜利, 乔亚榕, 高阳. 2016. 南海北部新生代海陆变迁与不同盆地的沉积充填响应. 古地理学报, 18(3): 349-366. [Yu X H, Li S L, Qiao Y R, Gao Y. 2016. The Cenozoic changes of seas and lands and sedimentary filling responses of different basins in northern South China Sea. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 18(3): 349-366]
- 张功成, 张厚和, 赵钊, 唐晓音, 王鹏, 李飞跃. 2016. “源热共控”中国近海盆地石油富集规律. 中国石油勘探, 21(4): 38-53. [Zhang G C, Zhang H H, Zhao Z, Tang X Y, Wang P, Li F Y. 2016. “Joint control of source rocks and geothermal heat”—oil enrichment pattern of China's offshore basins. China Petroleum Exploration, 21(4): 38-53]
- 张功成, 封从军, 陈莹, 曾清波, 杨东升, 郭帅, 焦保程, 姚兴宗, 葛艳龙. 2025. 南海北部陆缘渐进式裂陷控制烃源岩差异分布. 中国海上油气, 37(2): 27-44. [Zhang G C, Feng C J, Chen Y, Zeng Q B, Yang D S, Guo S, Jiao B C, Yao X Z, Ge Y L. 2025. Progressive rifting controls the differential distribution of source rocks in the northern continental margin of the South China Sea. China Offshore Oil and Gas, 37(2): 27-44]
- 张迎朝, 张坤坤, 袁冰, 李冰. 2014. 文昌凹陷新生界断裂体系与构造样式及对油气成藏的控制作用. 科学技术与工程, 14(23): 26-31. [Zhang Y Z, Zhang K K, Yuan B, Li B. 2014. Fault system and structural style of Cenozoic and their controlling effects on hydrocarbon-forming in Wenchang sag. Science Technology and Engineering, 14(23): 26-31]
- 郑金云, 高阳东, 张向涛, 庞雄, 张青林, 劳妙姬, 冯轩. 2022. 珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁. 地球科学, 47(7): 2374-2390. [Zheng J Y, Gao Y D, Zhang X T, Pang X, Zhang Q L, Lao M J, Feng X. 2022. Tectonic evolution cycles and Cenozoic sedimentary environment changes in Pearl River Mouth Basin. Earth Science, 47(7): 2374-2390]
- 朱明, 张向涛, 黄玉平, 朱俊章, 龙祖烈, 史玉玲, 石创, 张小龙. 2019. 珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力. 石油学报, 40(S1): 53-68. [Zhu M, Zhang X T, Huang Y P, Zhu J Z, Long Z L, Shi Y L, Shi C, Zhang X L. 2019. Source rock characteristics and resource potential in Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 40(S1): 53-68]
- 朱伟林, 吴景富, 张功成, 任建业, 赵志刚, 吴克强, 钟锴, 刘世翔. 2015. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向. 地学前缘, 22(1): 88-101. [Zhu W L, Wu J F, Zhang G C, Ren J Y, Zhao Z G, Wu K Q, Zhong K, Liu S X. 2015. Discrepancy tectonic evolution and petroleum exploration in China offshore Cenozoic basins. Earth Science Frontiers, 22(1): 88-101]

(责任编辑 郑秀娟 王绍华)