

文章编号: 1671-1505(2024)05-1108-19 DOI:10.7605/gdxb.2024.05.096

南海北缘陆相断陷盆地优质烃源岩发育机制： 以珠江口盆地顺德凹陷始新统文昌组为例^{*}

高梦天 尤 丽 胡高伟 龚 宇 李彦丽
陈亚兵 冯 琦 韩骏威 刘国麟

中海石油（中国）有限公司海南分公司，海南海口 570100

摘 要 珠江口盆地顺德凹陷始新统文昌组发育 3 套有利烃源岩，但对其层系归属、优质烃源岩特征和发育模式认识不清晰。基于高分辨率三维地震、钻井和地球化学资料，开展文昌组层序地层划分、梳理烃源岩发育特征、明确有机质富集主控因素并建立优质烃源岩发育模式。结果表明：顺德凹陷始新统文昌组可划分为 3 个三级层序，其中层序 SQ2 对应文昌组二段，烃源岩岩相类型以褐黑色、灰黑色纹层状页岩为主，有机质丰度较高，为优质烃源岩发育的主要时期。层序 SQ1 和 SQ3 分别对应文昌组三段和一段，烃源岩岩相以深灰色块状泥岩夹粉砂质泥岩为主，有机质丰度相对较低，主要发育一般烃源岩。有机质母源类型以陆源高等植物和水生浮游生物混源为主，其中层序 SQ2 时期藻类贡献较大。文昌组优质烃源岩发育受构造作用—古气候耦合约束，有机质富集主控因素为古生产力和古氧化还原条件。层序 SQ2 时期强断陷作用加剧火山活动，火山灰尘稳定沉降驱动古生产力较高；强烈的构造沉降及温暖—湿润的古气候促使湖平面上升，温度控制下的水体分层导致湖泊底水缺氧，于半深湖环境沉积厚层富有机质页岩。

关键词 断陷盆地 层序地层 有机质富集 发育模式 始新统 文昌组 顺德凹陷 珠江口盆地

第一作者简介 高梦天，男，1995 年生，工程师，硕士，主要从事层序地层学、沉积学及油气勘探地质综合研究。E-mail: gmt0520@163.com。

通讯作者简介 尤丽，女，1983 年生，高级工程师，博士，主要从事石油地质与勘探综合研究。E-mail: youli1@cnooc.com.cn。

中图分类号: P531 文献标志码: A

Formative mechanisms of high-quality source rocks in continental fault basin of northern South China Sea: a case study from the Eocene Wenchang Formation in Shunde sag, Pearl River Mouth Basin

GAO Mengtian YOU Li HU Gaowei GONG Yu LI Yanli

CHEN Yabing FENG Qi HAN Junwei LIU Guolin

Hainan Branch of CNOOC Ltd., Haikou 570100, China

Abstract Three sets of favorable source rocks developed in the Eocene Wenchang Formation of the

^{*} 中国海洋石油有限公司万亿大气区专项（编号：KJZH-2021-0003-00）和中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目（编号：KJGG-2022-0103, KJGG2022-0404）联合资助。[Co-funded by the Trillion Atmospheric Area Project of CNOOC Ltd.(No. KJZH-2021-0003-00) and '14th Five Year' Major Scientific and Technological Projects of CNOOC Ltd.(Nos. KJGG-2022-0103, KJGG2022-0404)]

收稿日期: 2024-04-30 改回日期: 2024-06-24

Shunde sag, Pearl River Mouth Basin. However, their stratigraphic attribution, organic matter characteristics and development patterns are unclear. Based on high-resolution 3D seismic, drilling, and geochemical data, this study documents sequence stratigraphic divisions of the Wenchang Formation, and sorted out the characteristics of hydrocarbon source rocks. The current study not only identifies main controlling factors for organic matter enrichment, but also establishes development patterns of high-quality hydrocarbon source rocks of the Wenchang Formation in Shunde sag. Results and observations from the current study suggest that the Eocene Wenchang Formation can be divided into three third-order sequences, among which the sequence SQ2 corresponds to the Member 2 of the Wenchang Formation. The lithofacies of source rocks developed during the development of SQ2 are mainly composed of brown-black and gray-black laminated shale with high organic matter abundance, and are considered as high-quality source rocks. The SQ1 and SQ3 sequences correspond, respectively, to the Members 3 and 1 of the Wenchang Formation. The lithofacies of source rocks developed during the development of SQ1 and SQ3 are mainly composed of dark-gray massive mudstone with silty mudstone with relatively low organic matter abundance. Also, the parent-source types of them were dominated by terrestrial higher plants and aquatic plankton, and the contribution of algae in the SQ2 sequence was more developed. The development of high-quality source rocks in the Wenchang Formation was constrained by tectonism-palaeoclimate coupling, which suggests that palaeoproductivity and palaeoredox conditions are the main controlling factors of organic matter enrichment. In addition, during the development of SQ2 sequence, the strong fault depression intensified volcanic activity which drove higher palaeoproductivity by large amount of volcanic dust subsiding stably. Also, the strong tectonic subsidence and the warm-humid palaeoclimate promoted the rise of lake levels, and the stratification of the water body under temperature control led to the oxygen depletion of the lake bottom water, giving rise to the thick organic-rich shales in the semi-deep lake environment.

Key words continental fault basin, sequence stratigraphy, organic matter enrichment, development pattern, Eocene, Wenchang Formation, Shunde sag, Pearl River Mouth Basin

About the first author GAO Mengtian, born in 1995, is an intermediate engineer. He is mainly engaged in sequence stratigraphy, sedimentology, comprehensive research of oil and gas exploration geology. E-mail: gmt0520@163.com.

About the corresponding author YOU Li, born in 1983, is a senior engineer. She is mainly engaged in comprehensive research on oil and gas exploration geology. E-mail: youli1@cnooc.com.cn.

面对当前复杂的油气勘探形势，陆相优质烃源岩具有重要的战略能源地位，其有机质富集机理和发育模式已然成为国内外关注的焦点 (Ma *et al.*, 2016; Pietras *et al.*, 2022; 米立军等, 2023)。受不同年代约束的构造、气候背景差异影响，目前已经建立的陆相细粒沉积岩有机质富集控制因素主要有古生产力条件 (Katz, 1995; Cao *et al.*, 2020)、古氧化还原条件 (Qiu and He, 2022; Ding *et al.*, 2023)、古盐度 (Wang *et al.*, 2021; 孟庆涛等, 2024)、陆源碎屑输入程度 (Sun *et al.*, 2013) 及火山-热液作用机制 (Xu *et al.*, 2022) 等。明确有机质富集的主控因素、合理建立富有机质泥页岩

发育模式，对深化认识湖盆体系优质烃源岩分布规律具有重要的指示意义。

新生代以来，太平洋板块俯冲后撤导致中国东部近海发育多个富生油断陷盆地 (米立军等, 2023)，如渤海湾盆地、北部湾盆地、珠江口盆地等。其中，位于南海北缘的珠江口盆地于始新统文昌组沉积厚层优质烃源岩，综合前人研究成果对其发育机理可归纳为 4 类：(1) 构造-气候驱动型 (Quan *et al.*, 2017)，强烈的构造沉降和温暖-湿润的气候条件为优质烃源岩形成创造了良好的沉积环境，且有利于藻类等低等水生植物勃发，为有机质富集提供较好的母源类型；(2) 古生产力-陆源

输入驱动型(何雁兵等, 2024), 高古生产力是有机质富集的主导因素, 低陆源碎屑输入能够减少有机质稀释程度, 有利于有机质保存; (3) 古陆源输入-氧化还原条件驱动型(彭光荣等, 2023), 低陆源碎屑输入和还原的水体环境耦合可为有机质富集创造良好的保存条件; (4) 热液作用驱动型(Xu *et al.*, 2022), 强烈的热液活动带来丰富的营养物质, 提高了初级生产力, 并且热液喷发易释放还原性气体, 促进底水体缺氧, 使有机质产生积累和保存。

2022 年, 顺德凹陷首口风险探井在文昌组揭开超百米厚层油页岩(徐长贵等, 2023), 揭示该区具备较好的油气勘探前景。与其他凹陷不同的是, 顺德凹陷形态相对狭小、构造-沉积结构较为独特, 且勘探程度较低。对其开展优质烃源岩发育机理研究, 不仅能够进一步完善南海北缘陆相湖盆富有机质细粒沉积岩形成机制, 也可为后续勘探部署提供坚实的理论支撑。目前对顺德凹陷有利烃源岩分布及特征方面已取得 3 点初步认识: (1) 顺德凹陷文昌期断陷作用较强, 平面发育多个 NE 向断裂带斜列展布, 另有少量 NEE 向断层, 具强活动特征(张功成, 2010; 吕彩丽等, 2017; 刘雨晴等, 2019), 地层沉降速率大(吕彩丽等, 2017; 马明等, 2019), 控制形成厚层优质烃源岩; (2) 顺德凹陷古近系构造层序界面特征清晰, 文昌期较恩平-珠海期水体规模大, 易发育半深湖相烃源岩(张功成等, 2009); (3) 文昌组二段发育厚层油页岩、富有机质页岩和泥岩, 干酪根以 I-II₁ 型为主, 具有丰富的藻类贡献(度雷等, 2023)。

但是, 受限于地质实物资料匮乏, 当前对顺德凹陷文昌组特征与烃源岩发育特征研究仍不够深入, 且不同层系间有机质差异富集机理认识不清晰。为此, 基于高分辨率三维地震资料、钻井和地球化学分析, 重点开展 3 项研究内容: (1) 理清顺德凹陷始新统文昌组层序地层界面划分依据及内部单元特征; (2) 梳理文昌组有利烃源岩差异发育特征; (3) 明确有机质富集主控因素, 建立文昌组优质烃源岩发育模式。

1 地质概况

珠江口盆地西南部的珠二坳陷, 位于现今南海陆架坡折之外的深水陆坡区, 包含 4 个三级构造单

元: 白云凹陷、荔湾凹陷、开平凹陷和顺德凹陷(图 1-a)。顺德凹陷处于珠二坳陷西侧, 东与开平凹陷相接, 北邻神狐隆起, 南接南部隆起。顺德凹陷前新生代位于火山弧区, 在拉张应力场作用下岩石圈垂向差异破裂导致裂陷成盆, 具“北断南超”窄半地堑结构(张功成, 2010; 吕彩丽等, 2017; 刘雨晴等, 2019), 北部控凹主断裂上升盘剥蚀区为神狐隆起, 南部发育顺德低隆起(图 1-b)。垂向上, 地层自下向上依次发育前古近系, 始新统文昌组, 渐新统恩平组、珠海组, 中新统珠江组、韩江组、粤海组—第四系(图 1; 图 2)。

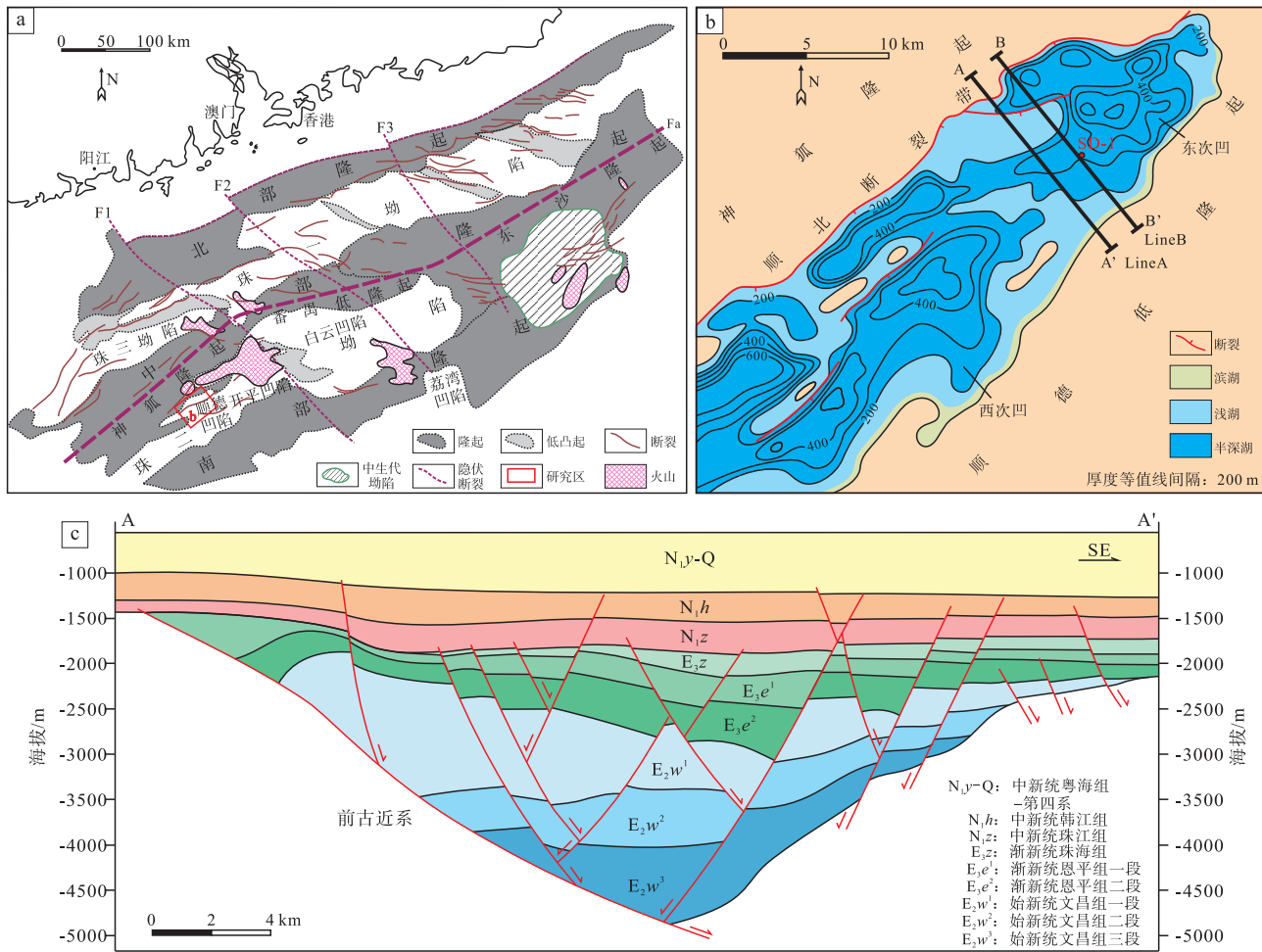
古近纪以来, 顺德凹陷先后经历了 3 期构造-沉积充填演化: (1) 始新世时期受北西向区域应力场作用, 凹陷进入断陷期, 在东北向主断裂控制下沉积文昌组, 发育厚层陆相油页岩、页岩和泥岩(图 1-b; 图 2); (2) 渐新世时期区域应力场转为南北向, 凹陷进入断拗转换期, 凹中断裂体系受走滑改造作用控制恩平组和珠海组沉积, 发育海陆过渡相沉积体系(图 1-c; 图 2); (3) 中新世至今, 凹陷进入拗陷期, 稳定沉积了珠江组、韩江组、粤海组、万山组和琼海组, 为海相沉积(图 1-c; 图 2)。

2 样品采集及实验方法

本研究高分辨率地震数据取自珠江口盆地顺德凹陷首批三维成果地震资料。SD-1 井位于顺德凹陷东次凹(图 1-b), 钻井样品主要为始新统文昌组岩屑和壁心(2350~3410 m 井段), 共计取样 30 件, 间隔为 6~230 m 不等, 岩性以褐黑色油页岩、灰黑色页岩、深灰色泥岩、深灰色粉砂质泥岩为主, 对其开展总有机碳、岩石热解分析、元素地球化学分析和生物标志化合物分析。所有实验均在中海油实验中心湛江实验中心完成。

2.1 TOC 和岩石热解

TOC 含量分析先取 70 mg 样品于坩埚中水浴加热至 60 ℃, 经浓度为 10% 的盐酸进行预处理后, 应用 LECO CS 400 碳硫分析仪测定含量, 过程遵循《GB/T 19145-2022》标准。使用 ROCK-EVAL 6 岩石热解仪对相同样品进行岩石热解测试, 主要分析样品的游离烃(S_1)、热解烃(S_2) 和最高热



a—珠江口盆地构造单元划分纲要图 (据 Guan *et al.*, 2016 修改); b—顺德凹陷始新统文昌组二段页岩相带及厚度分布图;
c—顺德凹陷构造—地层特征地质剖面 (Line A)

图 1 珠江口盆地顺德凹陷区域地质背景

Fig. 1 Regional geological background of Shunde sag, Pearl River Mouth Basin

解峰温 (T_{max}), 实验遵守《GB/T18602-2012》标准。氢指数 (HI) 求取公式为 $HI = 100 \times S_2 / TOC$ (Behar *et al.*, 2001)。

2.2 主、微量元素

主量元素含量通过电感耦合等离子发射光谱仪 (iCAP7400) 测定, 分析过程遵循《SY/T 6404-2018》标准。微量元素含量通过 ICP-MS 质谱仪进行测定, 分析过程遵循《GB/T14506-30-2019》标准。

化学蚀变指数 (CIA) 是进行风化程度及古气候恢复的常用元素地球化学指标 (Nesbitt and Young, 1982)。

$$CIA = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$$

式中 Al_2O_3 、 CaO^* 、 Na_2O 、 K_2O 均为摩尔数,

$CaO^* = \min (CaO - 10/3 \times P_2O_5, Na_2O)$, CaO^* 仅代表硅酸盐矿物中的 CaO (McLennan, 1993; Fedo *et al.*, 1995)。

元素富集指数 X_{EF} 能够反映沉积物中元素富集程度, 常被用来指示氧化还原条件, 计算公式为: $X_{EF} = (X/Al)_{\text{样品}} / (X/Al)_{\text{PAAS}}$ 。其中, X 为元素含量, PAAS 为后太古宙澳大利亚平均页岩的值 (Tribovillard *et al.*, 2006)。

2.3 生物标志化合物

生物标志化合物通过应用色谱质谱仪 (GC/MS) 测定, 过程遵循《GB/T18606-2017》标准。取适量样品, 加二氯甲烷试剂进行抽提, 过滤抽提液后挥干二氯甲烷试剂, 恒重。再取 20 mg 抽提物, 加入 30 mL 正己烷沉淀沥青质并进行过滤,

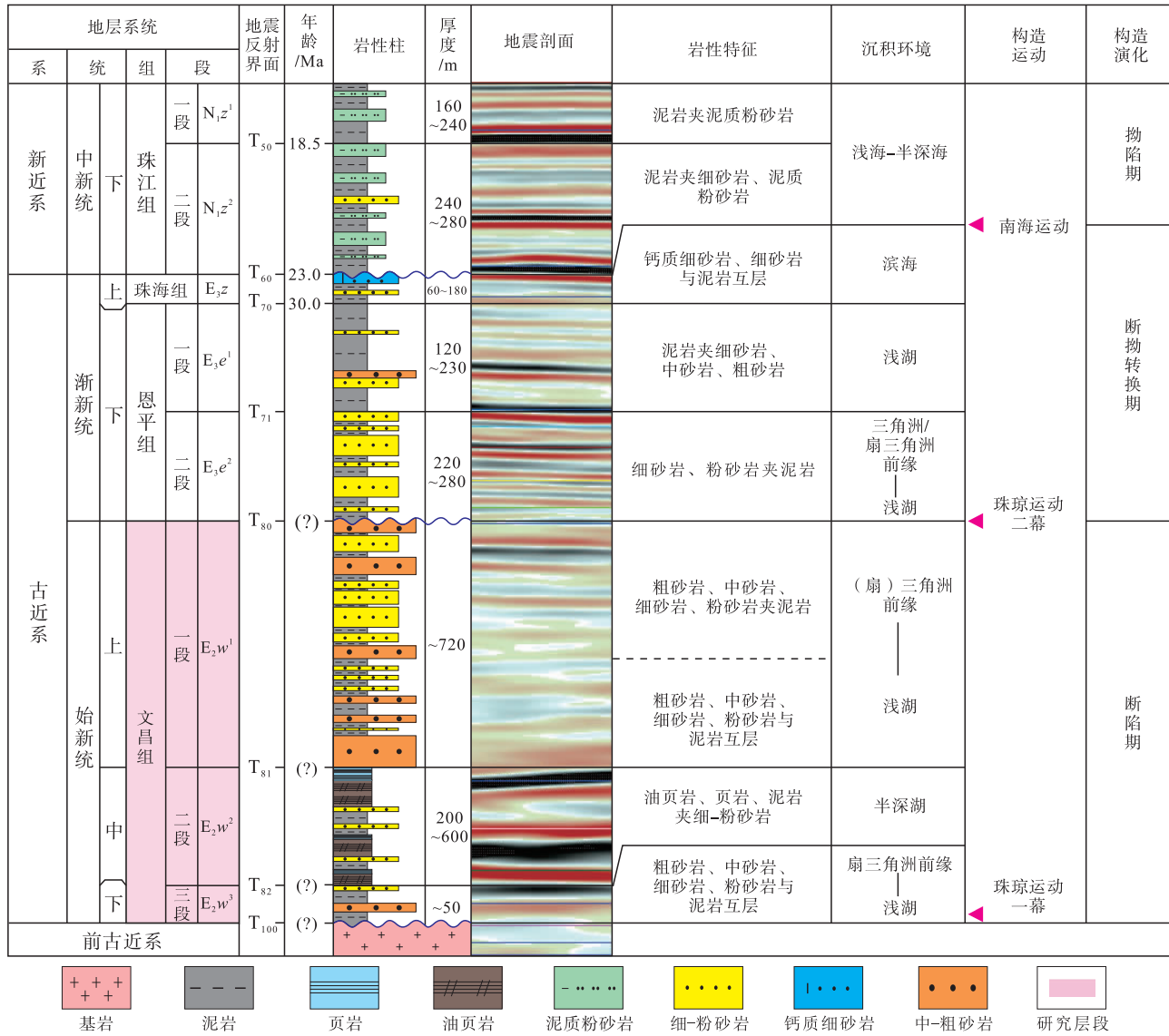


图 2 珠江口盆地顺德凹陷新生代地层综合柱状图

Fig. 2 Generalized the Cenozoic stratigraphy of Shunde sag, Pearl River Mouth Basin

将过滤后混合液加入层析柱内（硅胶 4g，氧化铝 3g），用 30 mL 正己烷分多次加入层析柱得到饱和烃组分。随后利用 GC/MS 仪器进行饱和烃测定。

3 井-震约束层序划分及特征

3.1 层序界面识别

区域性构造幕控制陆相断陷湖盆层序发育（朱筱敏等，2022），层序界面以识别不同级别的不整合面为依据（胡笙等，2020；高梦天等，2022；胡宗全等，2023；陈烨菲等，2024；殷树铮等，2024）。顺德凹陷文昌组沉积期对应珠琼运动

一幕，依据地震、钻井和测井资料，对文昌组准确识别 2 个二级层序界面、4 个三级层序界面。

3.1.1 前古近系—文昌组三段界面（T₁₀₀）

层序界面 T₁₀₀为珠琼运动一幕形成的二级层序界面，同属三级层序界面，为构造转换面，地震相具低频、中—弱振幅、较连续地震反射特征。界面可见明显下切不整合，界面之下表现为杂乱反射，界面之上具上超反射结构（图 3）。岩电特征方面，界面之上为文昌组三段厚层细砂岩、泥质粉砂岩；界面之下以出现厚层花岗岩基岩为标志。自然伽马、电阻率、速度均由高值突变为低值（图 4）。

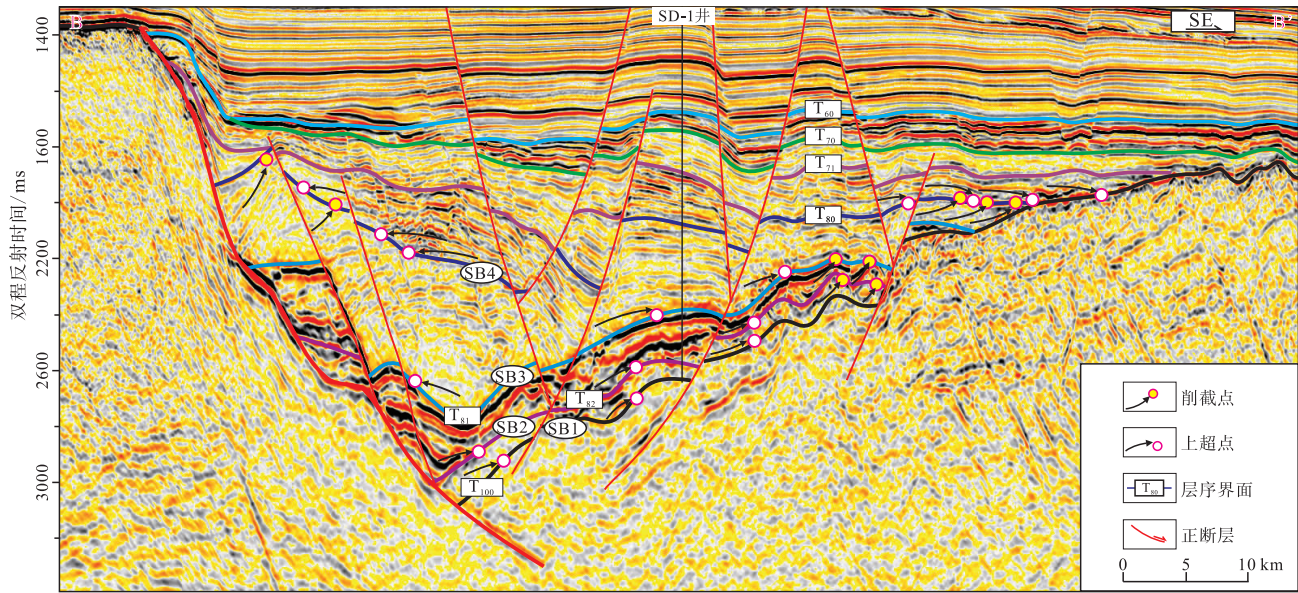


图 3 顺德凹陷文昌组地层划分典型地震剖面 (Line B)

Fig. 3 Typical seismic profiles for stratigraphic division of the Wenchang Formation in Shunde sag (Line B)

3.1.2 文昌组三段—文昌组二段界面 (T_{82})

层序界面 T_{82} 为相转换面，在顺德凹陷分布范围较小，地震相具低频、中弱振幅、较连续地震反射特征。凹中地层为相对整合接触关系，缓坡边缘地层“上超下削”特征明显，指示该阶段珠江运动一幕较强(图 3)。岩电特征方面，界面之上主要为文昌组二段厚层油页岩、页岩；界面之下以文昌组三段细砂岩、粉砂岩出现为标志。自然伽马由高值突变低值，电阻率由低值突变高值，速度由高值突变低值(图 4)。

3.1.3 文昌组一段—文昌组二段界面 (T_{81})

层序界面 T_{81} 为相转换面，在顺德凹陷分布较稳定，具低频、强振幅、连续地震反射特征。凹中地层呈相对整合关系，缓坡边缘地层上超、削截特征清晰，陡坡局部见上超点(图 3)。岩电特征方面，界面之上为文昌组一段厚层灰色砂砾岩；界面之下以文昌组二段厚层油页岩、页岩出现为标志。自然伽马由高值突变低值，电阻率、速度由低值突变高值(图 4)。

3.1.4 文昌组一段—恩平组二段界面 (T_{80})

层序界面 T_{80} 为珠江运动二幕形成的构造不整合面(二级层序界面)，也是区域上稳定分布的三级层序界面，属于构造转换面，具低频、中弱振幅、连续地震反射特征。凹中界面呈相对整合接触，两侧见多个上超、削截点，指示构造活动剧烈

(图 3)。岩电特征方面，界面之上为恩平组二段厚层灰色泥岩夹中砂岩、泥质细砂岩；界面之下以文昌组一段厚层褐红色泥岩、箱状粗砂岩出现为标志，自然伽马、电阻率由高值突变为低值，速度由低值突变为高值(图 4)。

3.2 层序地层特征

基于层序界面识别，顺德凹陷文昌组纵向可划分为 1 个二级层序和 3 个三级层序：(1) 层序 SQ1 对应文昌组三段 ($T_{100}-T_{82}$)，地震相整体表现为低频、中弱振幅、较连续特征，岩性主要为灰色长石英砂岩、细砂岩、粉砂岩与深灰色泥岩互层，自然伽马主要为“高幅齿型”、“箱型”、“漏斗型”，沉积相类型主要为扇三角洲相、湖泊相(高梦天等，2021, 2022)；(2) 层序 SQ2 对应文昌组二段 ($T_{82}-T_{81}$)，地震相具低频、强振幅、连续特征，与珠三坳陷文昌 B 凹文昌组二段特征相似，具有可比性。岩性主要为厚层褐黑色油页岩、灰黑色页岩夹灰色细砂岩、粉砂岩、黑色碳质泥岩、深灰色泥岩和粉砂质泥岩，自然伽马以“高幅齿型”为主，局部可见“指型”，主要发育湖泊相沉积；(3) 层序 SQ3 对应文昌组一段 ($T_{81}-T_{80}$)，地震相表现为低频、弱—中等振幅、较连续特征，岩性主要为灰色含砾中砂岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、泥质细砂岩与深灰色泥岩不等厚互层，以

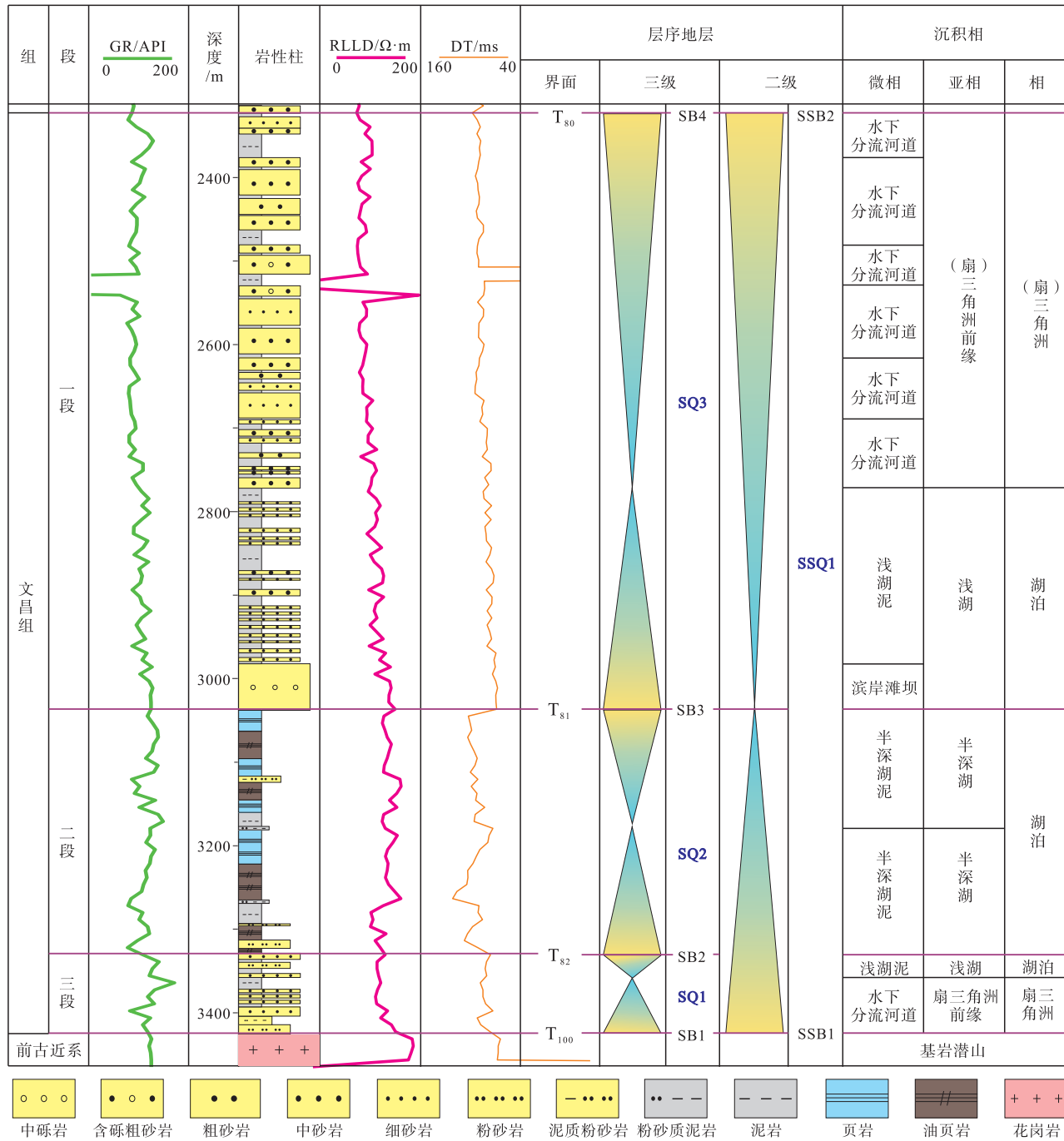


图 4 顺德凹陷 SD-1 井文昌组层序—沉积相综合柱状图

Fig. 4 Columnar section showing sequence and sedimentary facies of the Wenchang Formation in Shunde sag (Well SD-1)

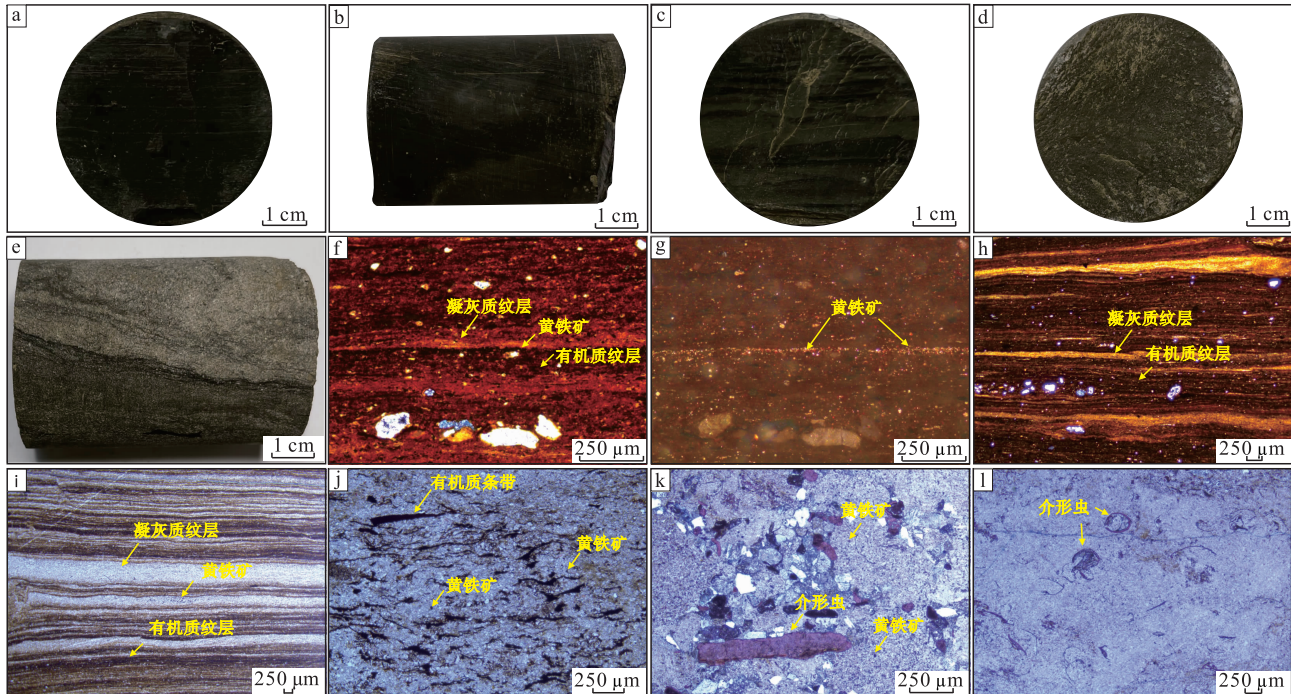
(扇)三角洲相、湖泊相沉积为主(图 3; 图 4)。

4 烃源岩发育特征

4.1 岩石学特征

顺德凹陷文昌组烃源岩主要包含 4 种岩相：褐黑色纹层状页岩、灰黑色纹层状页岩、深灰色块状

泥岩和粉砂质泥岩(图 5)。褐黑色、灰黑色纹层状页岩见水平纹层和波状纹层(图 5-a, 5-b, 5-c), 矿物组成以黏土为主, 发育少量石英、长石(图 5-f, 5-g, 5-h), 反映水深大、局部受波浪影响, 水动力较弱; 薄片见有机质纹层与凝灰质纹层互层, 且大量黄铁矿集合体沿有机质纹层密集展布, 有机质含量较高。深灰色块状泥岩矿物以石英为主, 凝



a—褐黑色富有机质页岩，水平纹层，3338.2 m；b—褐黑色富有机质页岩，3338.2 m；c—灰黑色纹层状页岩，波状纹层，3294.4 m；d—深灰色块状泥岩，3168 m；e—深灰色粉砂质块状泥岩，3177.5 m；f—褐黑色富有机质页岩，石英、长石和黏土矿物，大量黄铁矿沿厚层有机质纹层分布，单偏光，3256.5 m；g—褐黑色富有机质页岩，打光后见大量黄铁矿呈条带状延伸，3256.5 m；h—褐黑色富有机质页岩，厚层有机质纹层夹薄层凝灰质纹层，3256 m；i—灰黑色纹层状页岩，有机质纹层与火山灰互层，黄铁矿含量较高，呈带状密集分布，3309.6 m；j—深灰色块状泥岩，凝灰岩基质上有机质稀疏，见石英颗粒，黄铁矿单晶孤立分布，3177.5 m；k—深灰色粉砂质块状泥岩，石英、长石、黏土矿物，凝灰质基质，大量介形虫遗体；l—深灰色砂质块状泥岩，黏土矿物为主，凝灰质基质，大量介形虫遗体

图 5 顺德凹陷 SD-1 井文昌组典型壁心和薄片照片

Fig. 5 Representative core and thin sections from the Wenchang Formation in Shunde sag (Well SD-1)

灰质与黏土矿物混杂(图 5-d, 5-j)，反映水体较浅、水动力相对较强，有机质条带稀疏发育。深灰色块状粉砂质泥岩砂质含量较高，矿物以石英、长石为主，凝灰质较黏土矿物含量高(图 5-e, 5-k, 5-l)，反映水体浅、水动力较强，见大量生物遗体。

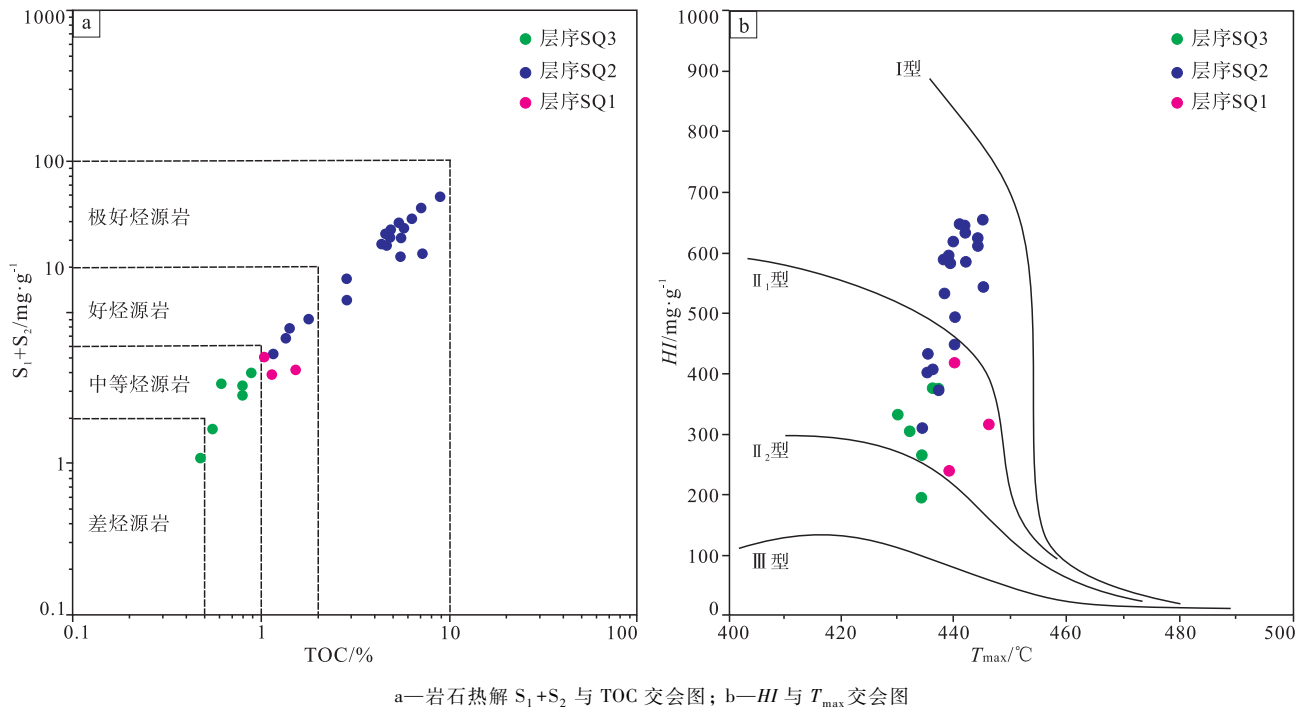
4.2 有机质丰度及类型

文昌组 TOC 含量和岩石热解 S_1+S_2 交会关系较好(图 6-a)。层序 SQ2 时期 TOC、 S_1+S_2 和 HI 最高，其中 TOC 含量范围在 1.04%~8.87% (平均值 4.41%)， S_1+S_2 范围在 5.28~41.21 mg/g (平均值 27.40 mg/g)，HI 介于 366~649 mg/g 之间 (平均值 532 mg/g)，指示高有机质丰度和较好的生油潜力，干酪根类型主要为 I 型和 II₁ 型(图 6-b)，发育好—极好烃源岩。层序 SQ1 时期 TOC、 S_1+S_2 和 HI 较高，其中 TOC 含量范围在 1.14%~1.52% (平均值 1.33%)， S_1+S_2 范围在

3.88~4.16 mg/g (平均值 4.02 mg/g)，HI 介于 238~314 mg/g 之间 (平均值 276 mg/g)，指示有机质丰度和生烃潜力一般，干酪根类型为 II₁ 型(图 6-b)，发育好烃源岩。层序 SQ3 时期有机质丰度和 HI 相对较低，TOC 含量范围在 0.48%~0.88% (平均值 0.69%)， S_1+S_2 范围在 1.09~3.97 mg/g (平均值 2.70 mg/g)，HI 介于 193~374 mg/g 之间 (平均值 305 mg/g)，干酪根类型以 II₁ 型为主(图 6-b)，发育中等烃源岩。

4.3 有机质来源

生物标志化合物是由碳、氢和其他元素组成的复杂有机化合物，基本保存了原始生物母质的特殊分子结构信息，是判识烃源岩有机质来源的可靠指标。正构烷烃和异戊二烯类烷烃中的甾烷含量对原始生化信息具有较好的指示作用，常被用来综合分析有机质母质来源 (Li *et al.*, 2021; Wu *et al.*,



a—岩石热解 S₁+S₂ 与 TOC 交会图; b—HI 与 T_{max} 交会图

图 6 顺德凹陷 SD-1 井文昌组烃源岩有机质类型

Fig. 6 Organic matter type from the Wenchang Formation source rocks in Shunde sag (Well SD-1)

2022a; 孟庆涛等, 2024)。

正构烷烃主要源自生物体及脂肪酸、蜡质等脂类化合物, 通常以 nC₂₇、nC₂₉、nC₃₁ 为主的长链正构烷烃表现为奇碳优势时, 指示有机质来源于陆源高等植物 (Cranwell, 1977; Ficken *et al.*, 2000); 而以 nC₁₃、nC₁₅、nC₁₇ 为主的短链正构烷烃呈现奇碳优势时, 则指示有机质来源主要为藻类和水生浮游生物 (Cranwell, 1977; Zdravkov *et al.*, 2017); 当短链、长链正构烷烃出现双峰时, 则表明同时混有浮游植物、藻类和陆生高等植物。层序 SQ2 时期正构烷烃奇碳优势不明显, 短链正构烷烃 nC₁₇ 与长链正构烷烃 nC₂₇、nC₂₉ 数值相当, 表现为弱双峰型, 反映母质为水生低等生物和陆生高等植物混源。层序 SQ1 和 SQ3 时期表现为以长链正构烷烃 nC₂₇ 和 nC₂₉ 高值的奇碳优势, 反映有机质母源以陆生高等植物为主 (图 7)。此外, C₂₇、C₂₈ 和 C₂₉ 甾烷也是判识母源类型的可靠依据, C₂₇ 甾烷主要源于水生浮游动植物和藻类, 而 C₂₉ 甾烷则富集于高等植物。文昌组 C₂₇ ααα 20R 甾烷含量 (19% ~ 44%, 平均值 31%) 整体略低于 C₂₉ ααα 20R 甾烷 (41% ~ 61%, 平均值 48%), M/Z = 217 质谱图中 C₂₇、C₂₈ 和 C₂₉ 甾烷表现为弱反 “L” 型, 结合 C₂₇-

C₂₈-C₂₉ ααα 20R 三角图综合判识文昌组有机质母源类型包括高等植物和水生浮游生物 (图 7; 图 8)。

层序 SQ2 时期干酪根类型为 I 和 II₁ 型, 且 4-甲基甾烷含量最高, 范围在 3.55% ~ 12.95% 之间, 平均值为 5.71%, 指示半深湖环境中藻类贡献相对较大; 层序 SQ1 和 SQ3 时期干酪根类型主要为 II₁ 型, 4-甲基甾烷含量相对较低, 指示浅湖环境中藻类贡献程度相对较小。综上所述, 顺德凹陷文昌组有机质主要为陆源高等植物和水生浮游生物混合来源, 层序 SQ2 时期藻类更为发育 (图 7), 层序 SQ1 和 SQ3 时期陆生高等植物贡献较大。

4.4 优质烃源岩特征及分布

上述分析综合表明, 层序 SQ2 时期烃源岩岩相组合主要为厚层褐黑色、灰黑色纹层状页岩, 有机质丰度最高, 有机质类型以 I 型和 II₁ 型为主, 有机质母源藻类贡献较大, 该时期沉积的文昌组二段为优质烃源岩发育的主要层系。层序 SQ1 和 SQ3 时期烃源岩岩相以深灰色块状泥岩为主, 有机质丰度相对较低, 有机质类型主要为 II₁ 型, 有机质母源陆源高等植物贡献较大, 该时期沉积的文昌组三段和文昌组一段主要发育一般烃源岩 (表 1)。

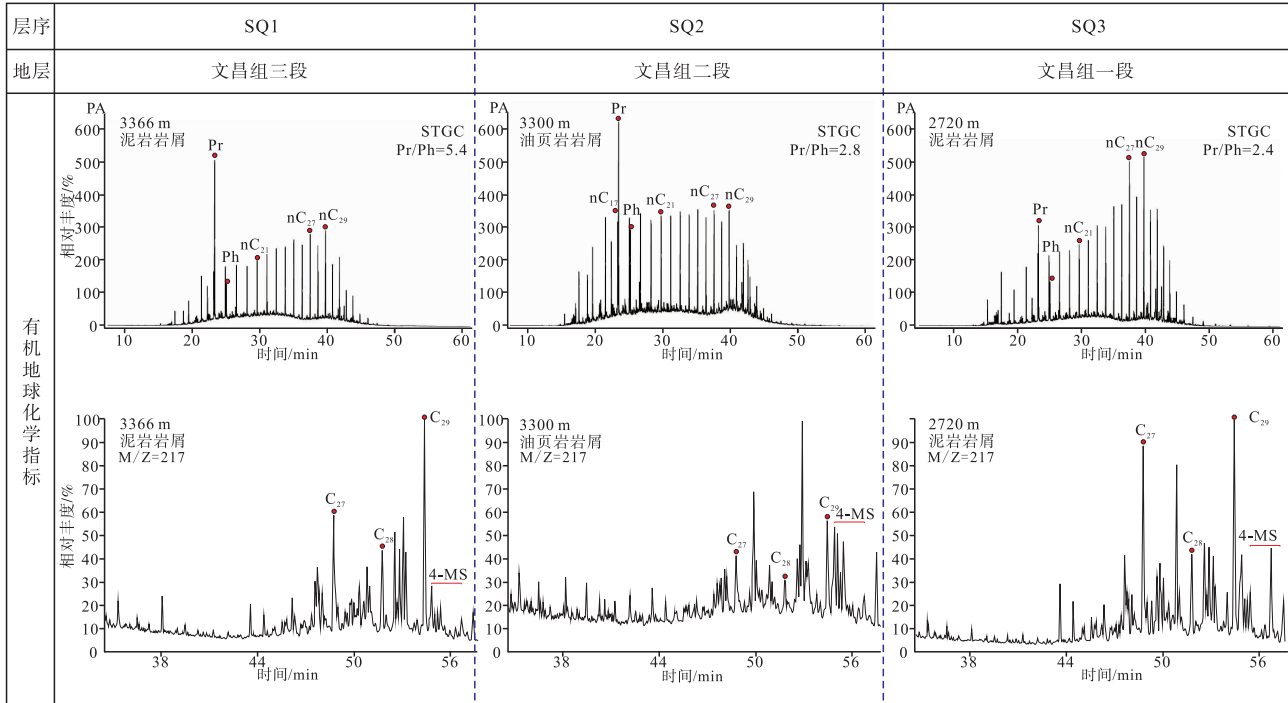


图 7 顺德凹陷 SD-1 井文昌组有机地球化学指标

Fig. 7 Organic geochemical data of the Wenchang Formation in Shunde sag (Well SD-1)

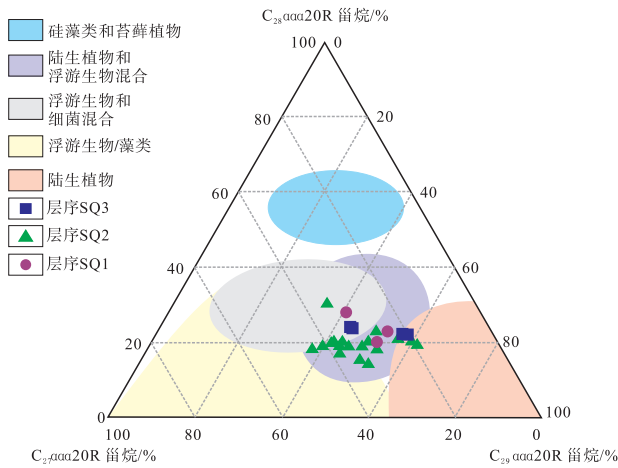


图 8 顺德凹陷 SD-1 井文昌组 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷三角图
(据 Huang and Meinschein, 1979; 有修改)

Fig. 8 Ternary plot showing distribution of C_{27} , C_{28} and C_{29} $\alpha\alpha$ 20R steranes of the Wenchang Formation in Shunde sag (Well SD-1) (modified from Huang and Meinschein, 1979)

5 有机质富集机制

5.1 构造作用与火山活动

构造作用控制湖盆演化和火山差异活动。新生代初期太平洋板块俯冲后撤，同期印度洋板块向北

与欧亚板块碰撞导致华南大陆开始发生裂解，南海北缘发生 NW-SE 向裂解，发育多个 NE-NNE 走向的断陷湖盆（李辉等，2023）。始新世，伴随板块运动水平拉张叠加岩石圈伸展变形触发地幔上涌，顺德凹陷进入断陷阶段，构造差异活动伴生不同程度的岩浆喷涌，岩性表现为凝灰质碎屑沉积岩，揭示存在火山喷发作用（单玄龙等，2023）。

层序 SQ1 时期，珠江运动一幕导致顺德凹陷进入初始裂陷期，盆地呈北东—南西向展布，盆缘断裂活动相对较弱，断层活动速率横向介于 5.2 ~ 23.6 m/Ma 之间（图 9-d），该阶段盆地张裂程度弱，湖盆面积较小，构造抬升导致相对湖平面较低（图 9-a），火山开始向上喷涌并易与短轴三角洲物源混合，形成块状构造的凝灰质碎屑岩，沉积中心以浅湖相深灰色块状泥岩为主，有机质含量相对较低，主要发育一般烃源岩（表 1）。

层序 SQ2 时期，珠江运动一幕作用最为剧烈，断层活动速率横向介于 6.9 ~ 66.2 m/Ma 之间（图 9-d），盆地断陷程度进一步加强，湖盆面积大幅增加，构造快速沉降促使湖平面快速上升（图 9-b），为主要的成盆期。该阶段盆地张裂程度最大，强构造作用下驱动火山喷涌能量较强，火

表 1 顺德凹陷文昌组烃源岩特征及分布对比

Table 1 Characteristics and distribution comparison of source rocks in the Wenchang Formation of Shunde sag

层序	SQ1	SQ2	SQ3
地层	文昌组三段	文昌组二段	文昌组一段
岩相组合	深灰色块状泥岩为主	褐黑色、灰黑色纹层状页岩为主	深灰色块状泥岩夹深灰色块状粉砂质泥岩
TOC/%	1.14~1.52/1.33	1.04~8.87/4.41	0.48~0.88/0.69
$S_1+S_2/mg \cdot g^{-1}$	3.88~4.16/4.02	5.28~41.21/27.40	1.09~3.97/2.70
$HI/mg \cdot g^{-1}$	238~314/276	366~649/532	193~374/305
有机质类型	II ₁ 型	I型和II ₁ 型	II ₁ 型
有机质来源	陆源高等植物和水生浮游生物, 陆源高等植物贡献较大	陆源高等植物和水生浮游生物, 藻类贡献较大	陆源高等植物和水生浮游生物, 陆源高等植物贡献较大
烃源岩品质	好烃源岩(一般烃源岩)	好—极好烃源岩(优质烃源岩)	中等烃源岩(一般烃源岩)

备注: 最小值~最大值/平均值。

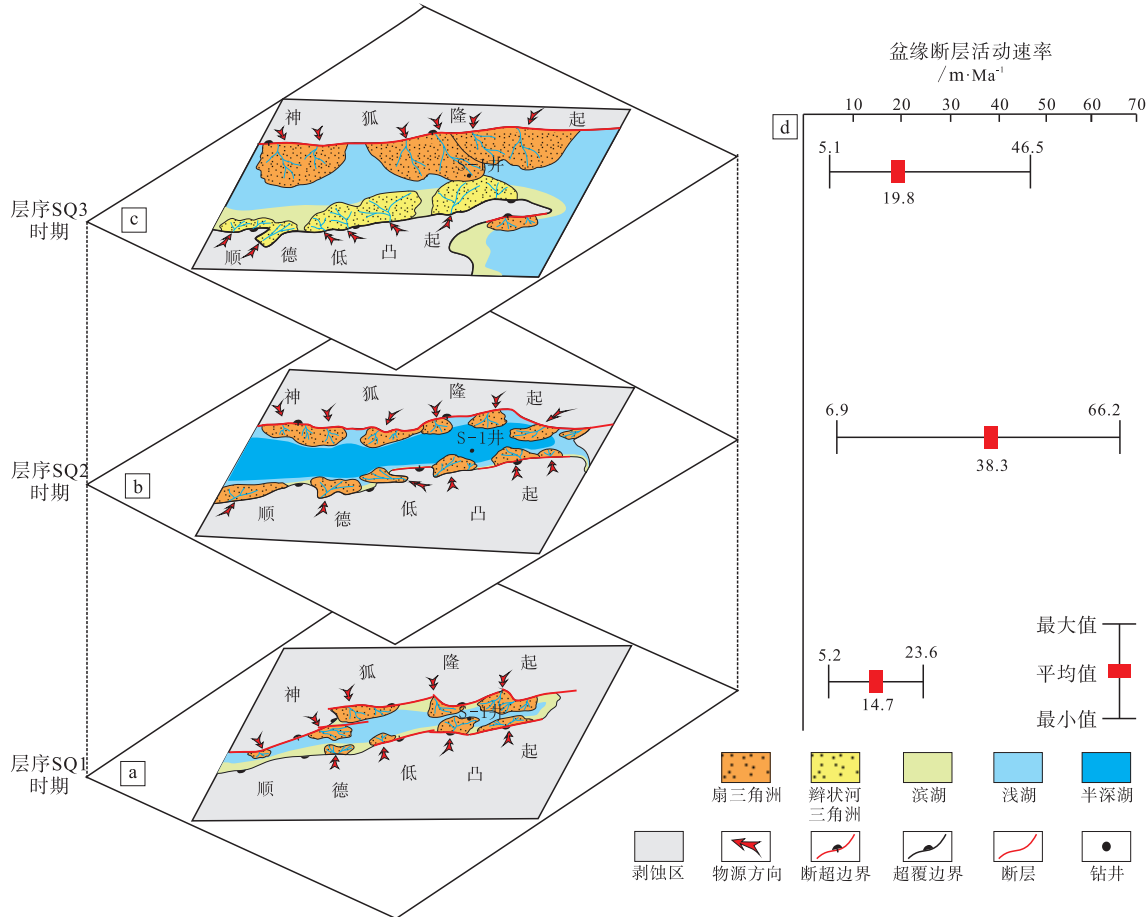


图 9 顺德凹陷文昌组断控沉积演化

Fig. 9 Fault controlled sedimentary evolution of the Wenchang Formation in Shunde sag

山灰尘与悬浮在半深湖中的泥质沉积物混合形成厚层褐黑色、灰黑色纹层状页岩，有机质含量较高，是优质烃源岩发育的关键时期(表 1)。

层序 SQ3 时期，珠琼运动一幕作用相对减弱，断层活动速率横向介于 5.1 ~ 46.5 m/Ma 之间(图 9-d)，该阶段湖盆进一步缓慢扩张，构造沉降速率降低导致相对湖平面下降(图 9-c)。伴随盆地拉张程度减弱，火山喷发能量衰减，地貌填平补齐阶段对应大规模陆源三角洲入湖，发育与文昌组一段相似的块状构造凝灰质碎屑岩，浅湖相泥岩有机质含量相对层序 SQ2 时期较低，以发育一般烃源岩为主(表 1)。

5.2 古气候条件

古气候条件能够有效控制湖盆及周缘化学风化速率与大气降水能力，进而影响湖平面的变化。化学蚀变指数(CIA)常被用来指示化学风化能力和古气候发育情况，数值越大反映化学风化能力越强，气候越温暖、湿润，降雨越充沛；反之，数值越小反映化学风化能力越弱，气候越寒冷干燥，降雨量越少(何雁兵等，2024)。CIA 值范围在 50 ~

70 之间指示弱化学风化程度，对应寒冷、干燥的气候；CIA 值范围在 70~80 之间指示中等化学风化程度，对应温凉、半湿润的气候；CIA 值范围在 80 ~100 之间指示强化学风化程度，对应温暖、湿润的气候(Wu *et al.*, 2022b; 张美洲等, 2023)。

层序 SQ2 时期 CIA 值最高，范围在 71.90 ~ 87.25 (平均值 81.91)，反映强烈的化学风化速率，气候温暖湿润，推测降雨量大导致湖平面相对较高，利于中深湖环境形成。层序 SQ1 和 SQ3 时期，CIA 值相对较低，分别为 63.77~72.40 (平均值 69.23) 和 57.49~77.97 (平均值 73.34)，反映化学风化程度中等，发育温凉、半湿润气候，推测降雨量相对较小，湖泊接收大气降水较少导致湖平面相对较低，主要发育浅湖相沉积(图 10)。

CIA 值与 TOC 含量呈明显正相关关系，相关系数达 0.46 (图 11-a)，表明温暖湿润的气候是驱动有机质富集的关键要素。

5.3 陆源碎屑输入

陆源碎屑输入速率是影响湖相烃源岩有机质富集的常见因素之一，适当的陆源输入有利于有机质

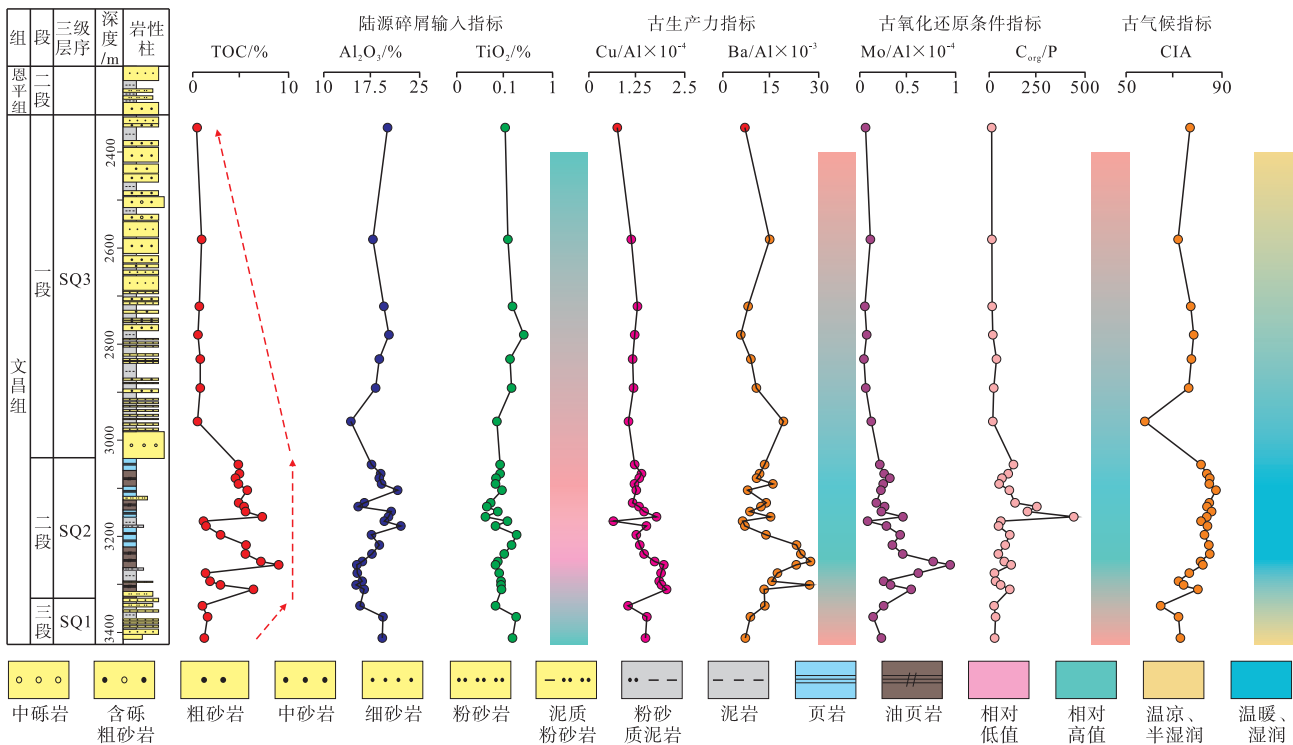


图 10 顺德凹陷 SD-1 井文昌组陆源碎屑输入、古生产力、古氧化还原条件、古气候指标

Fig. 10 Vertical distribution of terrigenous influx, palaeoproductivity, palaeoredox, and palaeoclimate parameters of Well SD-1 of the Wenchang Formation in Shunde sag

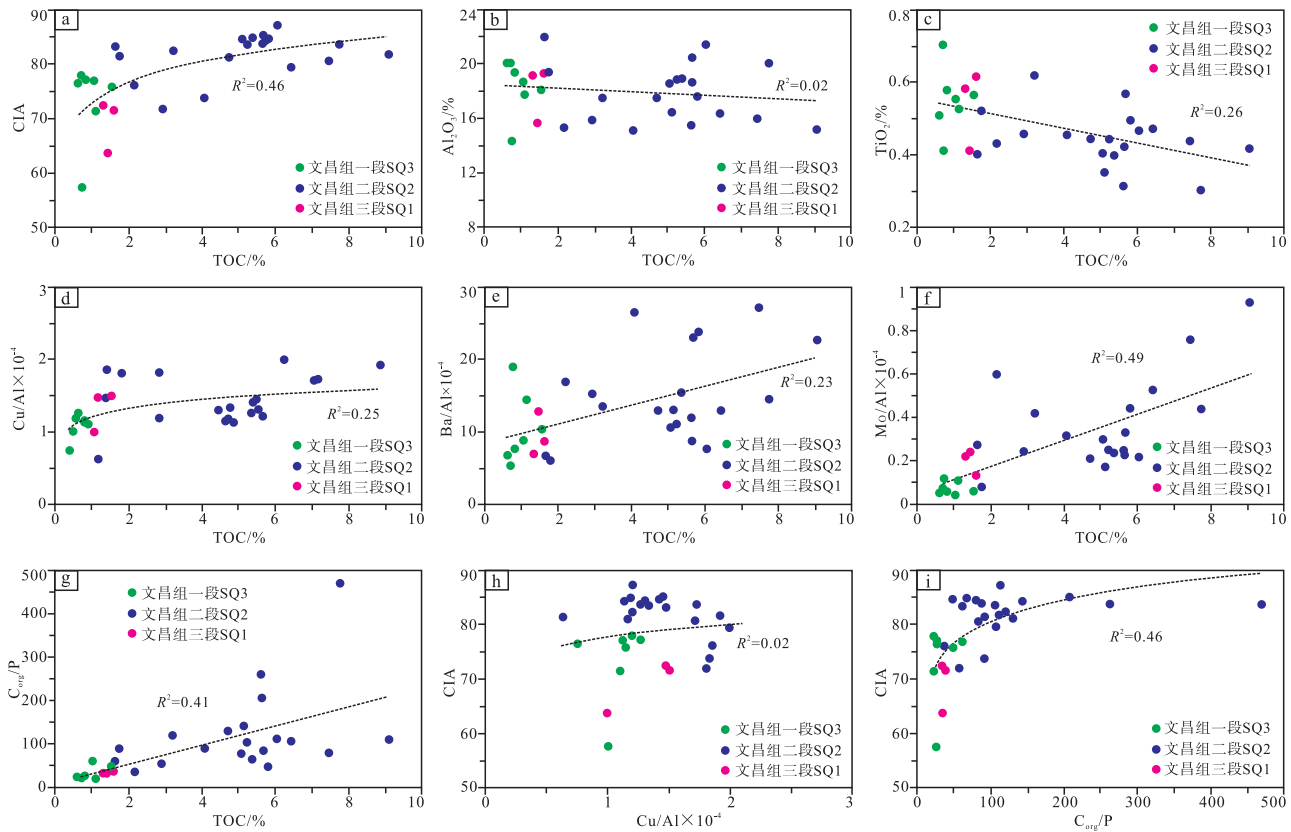


图 11 顺德凹陷 SD-1 井文昌组有机质富集因素相关性

Fig. 11 Correlation of organic matter enrichment factors of Well SD-1 of the Wenchang Formation in Shunde sag

在湖泊底部埋藏，但较强的陆源碎屑输入会对有机质产生稀释作用 (Li *et al.*, 2023)。Al₂O₃ 和 TiO₂ 为评估研究区陆源碎屑输入程度的有效指标，其中 Al₂O₃ 与长石、黏土等铝硅酸盐矿物有关，而 TiO₂ 则与重矿物和黏土有关，其数值越高反映陆源碎屑输入速率越大 (Wang *et al.*, 2021; 胡宗全等, 2023; 张美洲等, 2023)。

层序 SQ2 时期主要发育半深湖环境，Al₂O₃ 和 TiO₂ 含量相对较低，平均值分别为 17.83% 和 0.44%，薄片揭示褐黑色富有机质页岩、灰黑色纹层状页岩石英、长石矿物不发育，反映湖平面上升抑制了陆源碎屑输入速率，水动力条件较弱。层序 SQ1 时期以扇三角洲前缘—浅湖沉积为主，狭窄湖盆内扇三角洲前缘易向浅湖中输送石英、长石等碎屑矿物，Al₂O₃ 和 TiO₂ 含量相对较高，平均值分别为 18.04% 和 0.55%，指示较低湖平面背景下陆源碎屑输入程度较高，水动力较强。层序 SQ3 时期以 (扇) 三角洲前缘—浅湖沉积为主，且三角洲规模较大，Al₂O₃ 和 TiO₂ 含量最高，平均值分别为

18.34% 和 0.55%，反映强陆源碎屑输入程度 (图 10)。

Al₂O₃ 和 TiO₂ 含量与古气候指标具弱负相关性 (图 11)，表明陆源碎屑输入速率一定程度受到古气候条件的抑制。层序 SQ2 时期，暖湿气候下湖平面较高，物源供给速率小于可容纳空间增长速率，盆缘三角洲发育规模受限，向凹中输送陆源碎屑能力较弱。层序 SQ1 和 SQ3 时期，气候趋凉变干，湖平面相对较低，物源供给速率大于可容纳空间增长速率，导致陆源碎屑输入程度较强。并且，Al₂O₃、TiO₂ 与 TOC 含量表现为负相关 (图 11-b, 11-c)，指示相对较弱的陆源碎屑输入更有利于有机质富集。

5.4 古生产力

Cu、Ba 均是湖泊生态系统中水生浮游植物生长必不可少的营养元素，其含量是反映湖泊古生产力的有效地球化学指标。Cu 能够影响湖泊水生生物的代谢，常被用来指示古生产力变化 (Xu *et al.*, 2022); Ba 易被浮游植物吸收，随后在衰变

过程中常以重晶石的形式沉淀（牟传龙等，2016）。为消除陆源碎屑物质的影响，选取 Cu/Al 值、Ba/Al 值评估古生产力条件，其值越高指示古生产力勃发程度越强。此外，古生产力与火山活动密切相关，适量的火山灰溶于湖泊水体后可提供 Fe 等大量营养物质，有效促进浮游生物的蓬发，利于有机质富集；但过量的火山灰快速输入会带来硫化物等较多有毒物质，从而抑制湖泊生物生长（谢浩然等，2023）。

层序 SQ2 时期 Cu/Al 和 Ba/Al 值最高，分别为 1.63~2.00（平均值 1.45）和 8.79~27.27（平均值 15.12），反映高古生产力。层序 SQ1 和 SQ3 时期文昌组一段和三段 Cu/Al 值分别为 1.00~1.50（平均值 1.32）和 0.75~1.27（平均值 1.08），Ba/Al 值分别为 6.97~12.82（平均值 9.50）和 5.25~19.03（平均值 10.35），与层序 SQ2 时期相比较低，反映相对较低的古生产力（图 10）。

顺德凹陷文昌组烃源岩中见明显受火山喷发作用形成的凝灰质成分，其对古生产力的影响可通过岩相中凝灰质展布形态、单层厚度与有机质纹层的分布特征联合表征（图 5）。层序 SQ2 时期以厚层褐黑色、灰黑色纹层状页岩为主，凝灰质表现为纹层状，单层厚度较薄，范围分别为 25~183 μm 和 116~523 μm ，见厚层有机质纹层，反映半深湖水动力条件较弱，火山灰供给适中且稳定沉降，为浮游生物提供了充足的营养物质，有效促进了藻类的生长与勃发，促使古生产力较强。层序 SQ1 和 SQ3 时期以厚层深灰色块状泥岩为主，凝灰质呈片状展布，厚度较大，发育条带状有机质，且深灰色块状粉砂质泥岩见大量陆源碎屑颗粒和介形虫遗体，反映浅湖相水体相对较浅，水动力较强，大量陆源碎屑包裹凝灰质快速沉降导致水生生物规模死亡，一定程度抑制有机质的发育。

Cu/Al 值、Ba/Al 值与 TOC 含量均呈较好正相关性（ $R^2 = 0.23 \sim 0.25$ ），指示高古生产力是促进有机质富集的主要因素（图 11-d, 11-e）。古气候指标与 Cu/Al 值具弱正相关性（ $R^2 = 0.02$ ），指示温暖湿润的气候利于古生产力增长（图 11-h），但影响湖泊生产力的关键在于火山灰输入程度。

5.5 古氧化还原条件

湖泊水体氧化还原条件决定了有机质埋藏后能

否有效保存，常用 Mo/Al、 Mo_{EF} 、 U_{EF} 和 $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}$ 等元素地球化学指标综合表征，其值越高指示环境还原性越强。Mo 在氧化条件下常以 MoO_4^{2-} 形式存在，但在还原条件中能够以硫化物的形式迅速沉淀；同理，U 在还原条件下易与有机质结合形成络合物沉淀埋藏于盆底，两者对氧化还原条件均具有较强的敏感性（张美洲等，2023）。 $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}$ 受有机质和再矿化磷的比值影响，氧化条件下有机碳易分解且再矿化磷易保存，反之，还原条件下则利于有机碳保存和再矿化磷的散失。因此， $\text{C}_{\text{org}}/\text{P} < 50$ 指示氧化环境， $50 < \text{C}_{\text{org}}/\text{P} < 100$ 指示弱氧化环境， $\text{C}_{\text{org}}/\text{P} > 100$ 指示缺氧环境（Algeo and Ingall, 2007）。

层序 SQ2 时期 Mo/Al 值最高，范围在 0.08~0.93，平均值 0.36，指示相对还原的条件；层序 SQ1 和 SQ3 时期 Mo/Al 值相对较低，分别为 0.13~0.24（平均值 0.20）和 0.05~0.12（平均值 0.07），指示相对氧化的条件。 $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}$ 值与 Mo/Al 值变化趋势相似，层序 SQ2 时期范围在 23.98~435.15（平均值 112.08），反映整体处于缺氧—弱氧化环境；层序 SQ1 和 SQ3 时期 $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}$ 值均小于 50，反映处在偏氧化环境（图 10）。

$\text{Mo}_{\text{EF}} - \text{U}_{\text{EF}}$ 富集系数共变特征常被应用于重建海洋氧化还原条件，但 Liang 等（2020）通过将渤海湾盆地莱州湾凹陷（Liang *et al.*, 2020）、沾化凹陷（He *et al.*, 2017）和鄂尔多斯盆地（Wang *et al.*, 2017）不同水体环境对比后，认为 $\text{Mo}_{\text{EF}} - \text{U}_{\text{EF}}$ 协同共变在陆相盆地氧化还原条件重建中依然具有较好的适用性。根据图 12，指示层序 SQ2 时期主要处于缺氧—弱氧化环境；层序 SQ1 和 SQ3 时期处于弱氧化—氧化环境。

此外，黄铁矿发育程度也是指示水体氧化还原程度较为直观的指标，缺氧环境下黄铁矿生长速度快、数量多，分布窄；含氧环境中黄铁矿生长慢、数量少，主要以自形晶方式存在（曹涛涛等，2018；彭光荣等，2023；Zhou *et al.*, 2024）。据薄片可知，层序 SQ2 时期褐黑色富有机质页岩和灰黑色纹层状页岩中黄铁矿集合体呈条带状展布，且包裹于有机质纹层中，指示水体条件相对还原。层序 SQ1 和 SQ3 时期深灰色块状泥岩和黑色碳质泥岩中黄铁矿多呈单晶分散展布，且数量较少，指示相对氧化条件。

Mo/Al ($R^2 = 0.41$) 和 $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}$ ($R^2 = 0.49$) 与

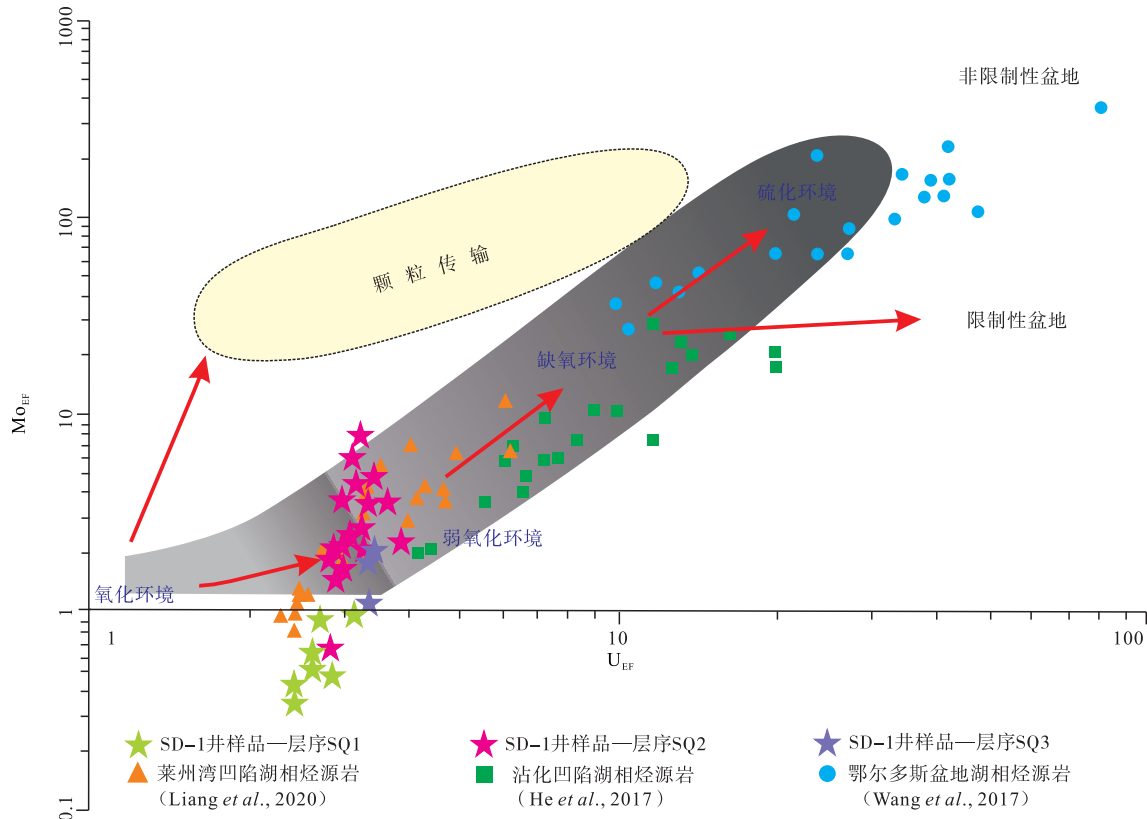


图 12 Mo_{EF} - U_{EF} 协同共变关系图 (据 Algeo and Tribovillard, 2009; 有修改)

Fig. 12 The covariation pattern of Mo_{EF} versus U_{EF} (modified from Algeo and Tribovillard, 2009)

TOC 呈较好正相关关系 (图 11-f, 11-g), 指示相对还原环境更利于高有机质发育, 是控制有机质富集的直接因素。值得注意的是, 古气候指标与 C_{org}/P 相关系数达 0.46 (图 11-i), 反映温暖湿润的气候易使湖水分层, 底水缺氧可为有机质埋藏提供良好的保存条件。

5.6 文昌组优质烃源岩发育模式

陆相优质烃源岩成因通常要考虑构造、古气候影响下的古生产力、古水深、古氧化还原条件、陆源碎屑输入等多种因素影响。顺德凹陷文昌组富含有机质泥页岩发育受构造作用—古气候联合约束, 而古生产力—古氧化还原条件是有机质富集的主控因素。

层序 SQ2 时期, 地幔热液强烈上涌导致顺德凹陷进入强断陷阶段, 周缘地震频发造成强烈的火山活动, 喷涌出的大量火山灰尘向湖中飘运。该时期气候温暖湿润, 强烈的构造沉降伴随大量的淡水输入促使相对湖平面快速上升, 半深湖背景有效抑制了南、北物源三角洲向盆内输送陆源碎屑物质。在弱水动力条件下, 远距离搬运的火山尘受重

力作用与湖中悬浮的细粒沉积物共同缓慢沉降, 并为水体带来丰富的 Fe、P、N 等营养物质, 促进藻类等浮游生物繁盛。同时, 水体受温度升高发生密度分层 (赵娜等, 2023), 表层水中浮游植物光合作用产生的氧气无法向底层水传输, 导致水体底部长期处于缺氧状态, 为浮游生物遗体和陆源高等植物有机质埋藏提供了有利的保存环境 (图 13-a)。因此, 高古生产力、缺氧—弱氧化条件为优质烃源岩发育提供了有力保障。

层序 SQ1 和 SQ3 时期, 顺德凹陷断陷作用较弱导致火山活动衰减。构造抬升和弱沉降伴随降雨量减少导致相对湖平面较低, 神狐隆起和顺德低凸起 (扇) 三角洲呈进积形态入湖, 火山尘易与陆源碎屑混合后快速沉降, 为湖泊带来硫化物、氯化物、氟化物等大量有毒物质, 造成湖泊生物规模死亡, 有机质受强陆源强供给发生稀释并迅速埋藏。此外, 气温较低使得湖水不易分层, 底部水体长期处于富氧环境, 在微生物作用下有机质降解速率加快, 导致有机质含量相对较低 (图 13-b)。

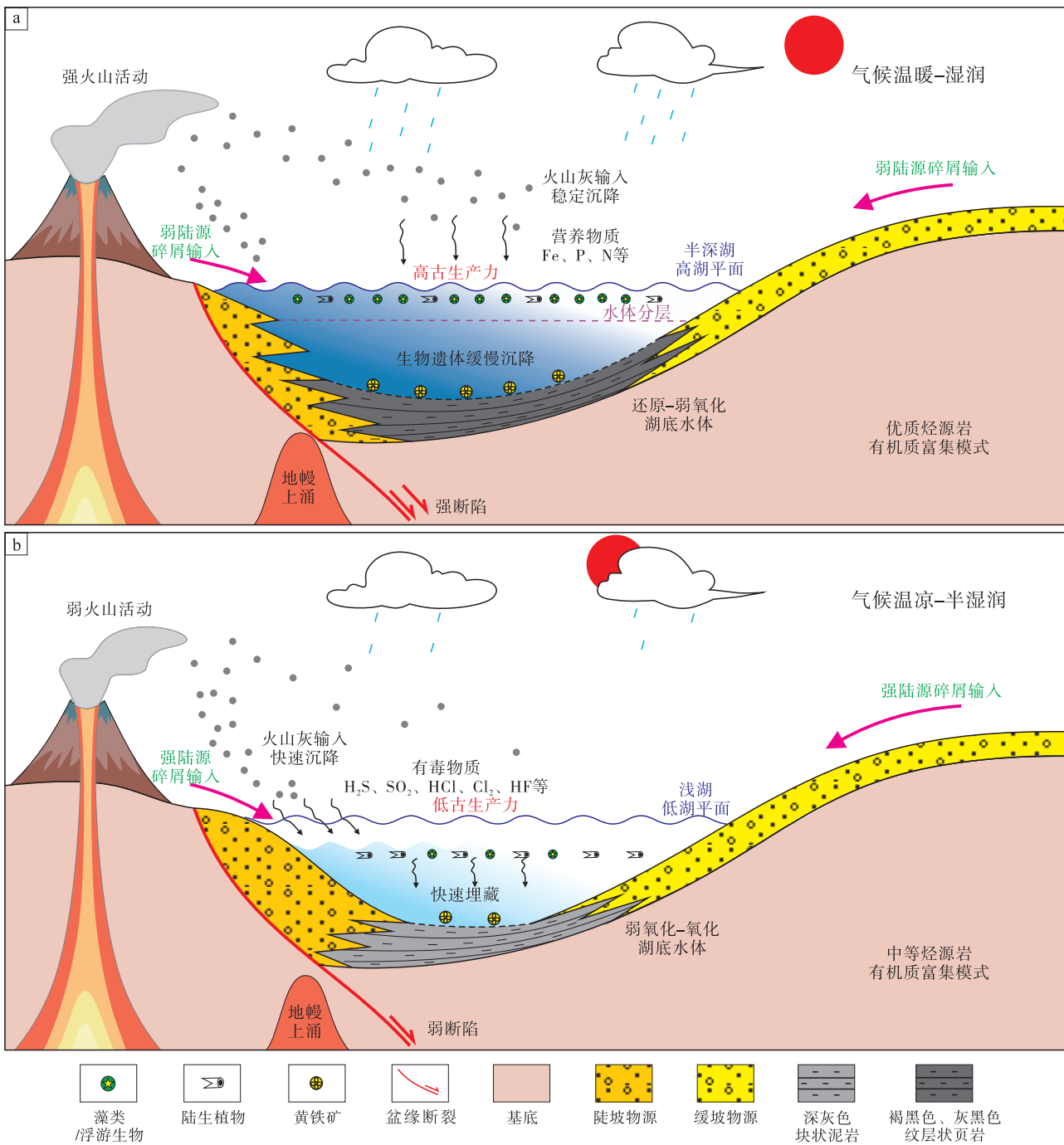


图 13 顺德凹陷文昌组优质烃源岩发育模式

Fig. 13 Development pattern of high-quality source rocks of the Wenchang Formation in Shunde sag

6 结论

1) 顺德凹陷始新统文昌组处于断陷期，地层接触关系具“上超下削”特征，共识别 2 个二级层序界面、4 个三级层序界面，划分为 1 个二级层序、3 个三级层序。其中，层序 SQ1 对应文昌组三段，层序 SQ2 对应文昌组二段，层序 SQ3 对应文

昌组一段，均发育有利烃源岩。

2) 层序 SQ2 时期烃源岩岩相类型以褐黑色、灰黑色纹层状页岩为主，有机质丰度相对较高、干酪根类型为 I-II₁ 型，有机质母源类型以陆源高等植物和水生浮游生物混源为主，藻类贡献较大，为优质烃源岩发育的有利阶段；层序 SQ1 和 SQ3 时期烃源岩岩相主要为深灰色块状泥岩夹粉砂质泥岩，

有机质丰度相对较低、干酪根类型为 II₁ 型, 陆源高等植物贡献较大, 发育一般烃源岩。

3) 文昌组富有机质泥页岩发育受构造作用—古气候耦合约束, 古生产力、古氧化还原条件是有有机质富集的主控因素。层序 SQ2 时期处于强断陷、温暖湿润背景, 相对湖平面较高、火山作用强烈, 具高古生产力、缺氧—弱氧条件, 半深湖环境中发育优质烃源岩; 层序 SQ1 和 SQ3 时期处于弱断陷、温凉—半湿润环境, 相对湖平面较低、火山作用较弱, 具较低古生产力、弱氧化—氧化条件, 浅湖环境中发育一般烃源岩。

参考文献 (References)

- 曹涛涛, 邓模, 宋之光, 刘光祥, 黄俨然. 2018. 黄铁矿对页岩油气富集成藏影响研究. 天然气地球科学, 29(3): 404-414. [Cao T T, Deng M, Song Z G, Liu G X, Huang Y R. 2018. Study on the effect of pyrite on the accumulation of shale oil and gas. *Natural Gas Geoscience*, 29(3): 404-414]
- 陈焯菲, 赵伦, 侯珏, 李毅, 王淑琴, 李建新. 2024. 滨里海盆地东缘北特鲁瓦油田石炭系层序地层与沉积演化特征. 古地理论, 26(1): 58-74. [Chen Y F, Zhao L, Hou Y, Li Y, Wang S Q, Li J X. 2024. Carboniferous sequence stratigraphy and sedimentary evolution in the North Troyes Oilfield, eastern margin of the Pre-Caspian Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(1): 58-74]
- 高梦天, 陆永潮, 杜学斌, 马义权, 张靖宇, 邓空. 2021. 致密砂岩多因子储层精细分级评价方法: 以东海盆地西湖凹陷渐新统花港组上段 H3 砂组为例. 石油实验地质, 43(6): 1097-1106. [Gao M T, Lu Y C, Du X B, Ma Y Q, Zhang J Y, Deng K. 2021. Multi-factor evaluation for fine grading of tight sandstone reservoirs: a case study from H3 sand group in the upper section. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(6): 1097-1106]
- 高梦天, 牟必鑫, 崔钦宇, 陈杨, 魏洪刚, 张靖宇, 邓空, 陆永潮. 2022. 西昌盆地上三叠统白果湾组层序格架下沉积演化及油气勘探意义. 天然气地球科学, 33(10): 1611-1627. [Gao M T, Mou B X, Cui Q Y, Chen Y, Wei H G, Zhang J Y, Deng K, Lu Y C. 2022. Sedimentary evolution under the sequence framework of the Upper Triassic Baiguowan Formation in Xichang Basin and its significance for oil and gas exploration. *Natural Gas Geoscience*, 33(10): 1611-1627]
- 何雁兵, 雷永昌, 邱欣卫, 肖张波, 郑仰帝, 刘冬青. 2024. 珠江口盆地陆丰南地区文昌组沉积古环境恢复及烃源岩有机质富集主控因素研究. 地学前缘, 31(2): 359-376. [He Y B, Lei Y C, Qiu X W, Xiao Z B, Zheng Y D, Liu D Q. 2024. Sedimentary paleoenvironment and main controlling factors of organic enrichment in source rocks of the Wenchang Formation in southern Lufeng, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science Frontiers*, 31(2): 359-376]
- 胡笙, 谭秀成, 罗冰, 张本健, 张亚, 苏成鹏, 芦飞凡, 李明隆. 2020. 四川盆地西北部二叠系栖霞阶层序地层特征及地质意义. 古地理论, 22(6): 1109-1126. [Hu S, Tan X C, Luo B, Zhang B J, Zhang Y, Su C P, Lu F F, Li M L. 2020. Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of the Permian Qixia Stage in northwestern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(6): 1109-1126]
- 胡宗全, 高志前, 刘旺威, 卫端. 2023. 塔里木盆地东北缘兴地断裂以北地区下寒武统富有机质泥页岩沉积环境与发育机制. 古地理论, 25(6): 1235-1256. [Hu Z Q, Gao Z Q, Liu W W, Wei D. 2023. Depositional environments and formational mechanisms of the Lower Cambrian organic-rich mud/shales, north of Xingdi Fault, northeastern Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(6): 1235-1256]
- 李辉, 姜振学, 徐旭辉, 邓勇, 范彩伟, 谭建财, 付大巍. 2023. 珠三拗陷南断裂带新生代发育演化的分段性及其对区域构造背景的影响. 地球科学, 48(12): 4575-4585. [Li H, Jiang Z X, Xu X H, Deng Y, Fan C W. 2023. Segmentation of Cenozoic Development and Evolution of Southern Fault Zone in Zhu-3 Depression and Its Response to Regional Tectonic Setting. *Earth Science*, 48(12): 4575-4585]
- 刘雨晴, 吴智平, 程燕君, 吴克强, 何敏, 张杰, 张劭, 陈明明. 2019. 南海北缘古近纪裂陷结构时空差异及控制因素: 以珠江口盆地为例. 中国矿业大学学报, 48(2): 367-376. [Liu Y Q, Wu Z P, Cheng Y J, Wu K Q, He M, Zhang J, Zhang M, Chen M M. 2019. Spatial and temporal difference of Paleogene rift structure and its controlling factors in the northern South China Sea: a case study of Pearl River Mouth basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 48(2): 367-376]
- 吕彩丽, 张功成, 杨东升. 2017. 珠江口盆地珠二拗陷文昌组构造差异性与其动力学成因机制. 地学前缘, 24(6): 333-341. [Lü C L, Zhang G C, Yang D S. 2017. Differential structure and dynamic mechanism of Wenchang formation in the Zhu H depression of the Pearl River mouth basin. *Earth Science Frontiers*, 24(6): 333-341]
- 马明, 漆家福, 张远泽, 苗全芸, 陈玮常, 张师. 2019. 珠江口盆地新生代沉降特征及其影响因素分析. 中国地质, 46(2): 269-289. [Ma M, Qi J F, Zhang Y Z, Miao Q Y, Chen W C, Zhang S. 2019. An analysis of subsidence characteristics and affecting factors in the Pearl River Mouth Basin in Cenozoic. *Geology in China*, 46(2): 269-289]
- 孟庆涛, 张训, 杨亮, 高家俊, 刘招君, 胡菲, 邢济麟, 张成铭, 康嘉楠, 崔博, 董秦玮, 张恩威. 2024. 陆相拗陷湖盆细粒沉积有机质富集机制研究: 以松辽盆地长岭凹陷青山口组为例. 古地理论, 26(2): 401-415. [Meng Q T, Zhang X, Yang L, Gao J J, Liu Z J, Hu F, Xing J L, Zhang C M, Kang J N, Cui B, Dong Q W, Zhang E W. 2024. Mechanism study of organic matter enrichment in fine-grained sediments in continental depression lacustrine basin: an example from the Qingshankou Formation in Changling Sag, Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(2): 401-415]

- 米立军,张功成,刘志峰,陈莹,白志钊. 2023. 中国近海富油凹陷相优质烃源岩发育机制. 石油学报,44(3): 405-419,509. [Mi L J,Zhang G C,Liu Z F,Chen Y,Bai Z Z. 2023. Discussion on the development mechanism of lacustrine high-quality source rocks in oil-rich sags in offshore China. Acta Petrolei Sinica,44(3): 405-419,509]
- 牟传龙,王秀平,王启宇,周恩恩,梁薇,葛祥英,陈小炜. 2016. 川南及邻区下志留统龙马溪组下段沉积相与页岩气地质条件的关系. 古地理学报,18(3): 457-472. [Mou C L,Wang X P,Wang Q Y,Zhou K K,Liang W,Ge X Y,Chen X W. 2016. Relationship between sedimentary facies and shale gas geological conditions of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its adjacent areas. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 18(3): 457-472]
- 彭光荣,陈聪,龙祖烈,张丽丽,汪旭东,马勇,辛志源,翟普强. 2023. 白云凹陷烃源岩有机质富集机理. 地质学报,97(12): 4164-4178. [Peng G R,Chen C,Long Z L,Zhang L L,Wang X D,Ma Y,Xin Z Y,Zhai P Q. 2023. Organic matter enrichment mechanism of different types of source rocks in the Baiyun sag. Acta Geologica Sinica,97(12): 4164-4178]
- 单玄龙,牟汉生,刘玉虎,李瑞磊,朱建峰,石云倩,冷庆磊,衣健. 2023. 湖盆水下喷发火山岩相类型、特征与储集意义:以松辽盆地南部查干花地区白垩系为例. 石油勘探与开发,50(4): 719-730. [Shan X L,Mu H S,Liu Y H,Li R L,Zhu J F,Shi Y Q,Leng Q L,Yi J. 2023. Subaqueous volcanic eruptive facies, facies model and its reservoir significance in a continental lacustrine basin: a case from the Cretaceous in Chaganhua area of southern Songliao Basin, NE China. Petroleum Exploration and Development,50(4): 719-730]
- 虞雷,胡林,周杰,刘海钰,梁刚. 2023. 珠江口盆地顺德凹陷稠油特征及成因分析. 中国海上油气,35(5): 14-23. [Tuo L,Hu L,Zhou J,Liu H Y,Liang G. 2023. Characteristics and genesis of Paleogene heavy oil in Shunde sag of the Pearl River Mouth Basin. China Offshore Oil and Gas,35(5): 14-23]
- 谢浩然,梁超,吴靖,籍士超. 2023. 火山活动对沉积古环境及有机质富集的影响. 古地理学报,25(4): 768-787. [Xie H R,Liang C,Wu J,Ji S C. 2023. Impacts of volcanic activity on sedimentary palaeo-environment and organic matter enrichment. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),25(4): 768-787]
- 徐长贵,赖维成,张新涛,张锦伟. 2023. 中国海油气勘探新进展与未来勘探思考. 中国海上油气,35(2): 1-12. [Xu C G,Lai W C,Zhang X T,Zhang J W. 2023. New progress and future exploration thinking of CNOOC oil and gas exploration. China Offshore Oil and Gas,35(2): 1-12]
- 殷树铮,郭文建,李新宁,周志超,刘文辉,焦立新,何登发. 2024. 准噶尔盆地西部拗陷带二叠系构造—地层层序与盆地演化. 古地理学报,26(1): 132-149. [Yin S Z,Guo W J,Li X N,Zhou Z C,Liu W H,Jiao L X,He D F. 2024. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution in West Depression of Junggar Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),26(1): 132-149]
- 张功成,刘震,米立军,沈怀磊,郭瑞. 2009. 珠江口盆地—琼东南盆地深水区古近系沉积演化. 沉积学报,27(4): 632-641. [Zhang G C,Liu Z,Mi L J,Shen H L,Guo R. 2009. Sedimentary evolution of Paleogene series in deep water area of Zhujiangkou and Qiongdongnan Basin. Acta Sedimentologica Sinica,27(4): 632-641]
- 张功成. 2010. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征. 石油学报,34(4): 528-533,541. [Zhang G C. 2010. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea. Acta Petrolei Sinica,34(4): 528-533,541]
- 张美洲,朱筱敏,姜振学,朱德宇,叶蕾,谌志远. 2023. 陆相淡水湖盆页岩有机质富集主控因素研究:以四川盆地东北部侏罗系自流井组为例. 古地理学报,25(4): 806-822. [Zhang M Z,Zhu X M,Jiang Z X,Zhu D Y,Ye L,Chen Z Y. 2023. Main controlling factors of organic matter enrichment in continental freshwater lacustrine shale: a case study of the Jurassic Ziliujing Formation in northeastern Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(4): 806-822]
- 赵娜,曹瑞华,黄廷林,文刚. 2023. 水源水库温跃层溶解氧最小值条件下天冬氨酸的转化规律与机制. 中国环境科学,43(10): 5529-5542. [Zhao N,Cao R H,Huang T L,Wen G. 2023. Transformation and mechanism of aspartic acid under metalimnetic oxygen minimum condition in water source reservoirs. China Environmental Science,43(10): 5529-5542]
- 朱筱敏,陈贺贺,葛家旺,谈明轩,刘强虎,张自力,张亚雄. 2022. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征. 石油与天然气地质,43(4): 746-762. [Zhu X M,Chen H H,Ge J W,Tan M X,Liu Q H,Zhang Z L,Zhang Y X. 2022. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins. Oil and Gas Geology, 43(4): 746-762]
- Algeo T J,Ingall E. 2007. Sedimentary Corg: pratio, paleocean ventilation, and Phanerozoic atmospheric pO₂. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,256(3-4): 130-155.
- Algeo T J,Tribovillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation. Chemical Geology,268(3-4): 211-225.
- Cao L,Zhang Z H,Li H Y,Zhong N N,Xiao L L,Jin X,Li H. 2020. Mechanism for the enrichment of organic matter in the Liushagang Formation of the Weixinan Sag, Beibuwan Basin, China. Marine and Petroleum Geology,122: 104649.
- Cranwell P A. 1977. Organic geochemistry of Cam Loch (Sutherland) sediments. Chemical Geology,20: 205-221.
- Ding X J,He W J,Liu H L,Guo X G,Zha M,Jiang Z F. 2023. Organic matter accumulation in lacustrine shale of the Permian Jimsar sag, Junggar Basin, NW China. Petroleum Science,20: 1327-1346.
- Fedo C M,Nesbitt W H,Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology, 23(10): 921-924.
- Ficken K J,Li B,Swain D L,Eglinton G. 2000. An n-alkane proxy for the

- sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 31(7-8): 745-749.
- He C, Ji L M, Su A, Wu Y D, Zhang M Z, Zhou S X, Li J, Hao L W, Ma Y. 2017. Source-rock evaluation and depositional environment of black shales in the Triassic Yanchang Formation, southern Ordos Basin, north-central China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173: 899-911.
- Huang W Y, Meinschein W G. 1979. Sterols as ecological indicators. *Geochim Cosmochim Acta*, 43: 739-745.
- Katz B J. 1995. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks-an update. *AAPG Studies in Geology*, 40: 61-79.
- Li Q Q, Xu S, Hao F, Shu Z G, Chen F L, Lu Y C, Wu S Q, Zhang L. 2021. Geochemical characteristics and organic matter accumulation of argillaceous dolomite in a saline lacustrine basin: a case study from the paleogene xingouzui formation, Jiangnan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 128: 105041.
- Li C, Chen S J, Liao J B, Hou Y T, Yu J, Liu G L, Xu K, Wu X T. 2023. Geochemical characteristics of the Chang 7 Member in the southwestern Ordos Basin, China: the influence of sedimentary environment on the organic matter enrichment. *Palaeoworld*, 3: 1-13.
- Liang H R, Xu G S, Xu F H, Yu Q, Liang J J, Wang D Y. 2020. Palaeoenvironmental evolution and organic matter accumulation in an oxygen-enriched lacustrine basin: a case study from the Laizhou Bay Sag, southern Bohai Sea(China). *International Journal of Coal Geology*, 217: 103318.
- Ma Y Q, Fan M J, Lu Y C, Liu H M, Hao Y Q, Xie Z H, Liu Z H, Peng L, Du X B, Hu H Y. 2016. Climate-driven paleolimnological change controls lacustrine mudstone depositional process and organic matter accumulation: constraints from lithofacies and geochemical studies in the Zhanhua Depression, eastern China. *International Journal of Coal Geology*, 167: 103-118.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. *The Journal of Geology*, 101: 295-303.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715-717.
- Pietras J T, Dennett A, Selby D, Birdwell J E. 2022. The role of organic matter diversity on the Re-Os systematics of organic-rich sedimentary units: insights into the controls of isochron age determinations from the lacustrine Green River Formation. *Chemical Geology*, 604: 120939.
- Qiu Z, He J L. 2022. Depositional environment changes and organic matter accumulation of Pliensbachian-Toarcian lacustrine shales in the Sichuan basin, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 232: 105035.
- Quan Y B, Hao F, Liu J Z, Zhao D J, Tian J Q, Wang Z F. 2017. Source rock deposition controlled by tectonic subsidence and climate in the western Pearl River Mouth Basin, China: evidence from organic and inorganic geochemistry. *Marine and Petroleum Geology*, 79: 1-17.
- Sun P C, Sachsenhofer R F, Liu Z J, Strobl S A I, Meng Q T, Liu R, Zhen Z. 2013. Organic matter accumulation in the oil shale-and coal-bearing Huadian Basin (Eocene; NE China). *International Journal of Coal Geology*, 105: 1-15.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metal as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*: 12-32.
- Wang C, Wang Q X, Chen G J, He L, Xu Y, Chen L Y, Chen D F. 2017. Petrographic and geochemical characteristics of the lacustrine black shales from the Upper Triassic Yanchang Formation of the Ordos Basin, China: implications for the organic matter accumulation. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 52-65.
- Wang Y X, Xu S, Hao F, Poulton S, Zhang Y Y, Guo T X, Lu Y B, Nan B. 2021. Arid climate disturbance and the development of salinized lacustrine oil shale in the Middle Jurassic Dameigou Formation, Qaidam Basin, northwestern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 577: 110533.
- Wu Z R, Grohmann S, Littke R, Guo T X, He S, Baniasad A. 2022a. Organic petrologic and geochemical characterization of petroleum source rocks in the Middle Jurassic Dameigou Formation, Qaidam Basin, northwestern China: insights into paleo-depositional environment and organic matter accumulation. *International Journal of Coal Geology*, 259: 104038.
- Wu Z R, He S, He Z L, Li X C, Zhai G Y, Huang Z Q. 2022b. Petrographical and geochemical characterization of the Upper Permian Longtan formation and Dalong Formation in the Lower Yangtze region, South China: implications for provenance, paleoclimate, paleoenvironment and organic matter accumulation mechanisms. *Marine and Petroleum Geology*, 139: 105580.
- Xu C, Shan X L, Lin H M, Hao G L, Liu Pe, Wang X D, Shen M R, Rexiti Y, Li K, Li Z S, Wang X M, Du X D, Zhang Z W, Jia P M, He W T. 2022. The formation of early Eocene organic-rich mudstone in the western Pearl River Mouth Basin, South China: insight from paleoclimate and hydrothermal activity. *International Journal of Coal Geology*, 253: 103957.
- Zdravkova A, Bechtel A, Sachsenhofer R F, Kortensia J. 2017. Palaeoenvironmental implications of coal formation in Dobrudzha Basin, Bulgaria: insights from organic petrological and geochemical properties. *International Journal of Coal Geology*, 180: 1-17.
- Zhou Q S, Liu J Y, Ma B, Li C, Xiao Y Y, Chen G J, Lyu C F. 2024. Pyrite characteristics in lacustrine shale and implications for organic matter enrichment and shale oil: a case study from the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, NW China. *ACS Omega*, 9: 16519-16535.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 龚承林)