



## 珠一坳陷湖盆古环境恢复与优质烃源岩发育模式

谢世文, 王宇辰, 舒 誉, 吴宇翔, 张丽丽, 刘冬青, 王 菲

### Environmental reconstruction for the paleo-lake of Zhu I depression and the depositional model for high-quality source rocks

XIE Shiwen, WANG Yuchen, SHU Yu, WU Yuxiang, ZHANG Lili, LIU Dongqing, and WANG Fei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021110901>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 南海南部海陆过渡相烃源岩的两类分布模式

Two distribution patterns of the marine–continental transitional source rocks in the southern South China Sea  
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 173

#### 北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin  
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194

#### 华南下扬子区早寒武世幕府山组沉积环境：来自于全岩地球化学的启示

Sedimentary environment of the Lower Cambrian Mufushan Formation in the Lower Yangtze region: Evidence from whole–rock geochemistry  
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 82

#### 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances  
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

#### 生物载体对海底冷泉–热液极端环境的地球化学记录

Geochemical records of biological carriers on deepsea hydrothermal vent and methane seep fields  
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 42

#### 山东即墨马山粗面英安岩年代学与地球化学特征及其地质意义

Geochronology and geochemistry of Mashan trachydacite, JiMo District, Shandong Province and their geological implications  
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 138



关注微信公众号，获得更多资讯信息

谢世文, 王宇辰, 舒誉, 等. 珠一坳陷湖盆古环境恢复与优质烃源岩发育模式 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 159-169.  
XIE Shiwen, WANG Yuchen, SHU Yu, et al. Environmental reconstruction for the paleo-lake of Zhu I depression and the depositional model for high-quality source rocks[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 159-169.

# 珠一坳陷湖盆古环境恢复与优质烃源岩发育模式

谢世文, 王宇辰, 舒誉, 吴宇翔, 张丽丽, 刘冬青, 王菲

中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518067

**摘要:** 珠一坳陷古近纪陆相湖盆发育优质烃源岩, 通过对文昌组、恩平组泥岩系统取样, 进行常量、微量元素、同位素含量等分析, 优选出对环境敏感的元素与元素比值, 系统分析了珠一坳陷烃源岩形成时的古环境, 包括古盐度、古水深、氧化还原条件、古气候及古水体的封闭性, 并建立了有机碳与环境敏感元素比值的定量关系。开展优质烃源岩发育的水化学性质研究, 明确研究区优质烃源岩形成演化所具有的古环境特征, 最终探讨了文昌组优质烃源岩的发育模式。研究结果表明, 珠一坳陷(除韩江凹陷无样本地)文昌期温暖略干气候条件下, 湖盆水体主要为淡水—微咸水, 发育中—深湖相, 整体表现为开放—半封闭、还原—强还原的环境, 极利于有机质的保存和优质烃源岩的发育, 各凹陷古环境差异不大。烃源岩质量与咸度、水深、还原条件呈正相关, 共同影响了优质烃源岩的发育。总之, 温暖略干、微咸、深水及强还原、开放—半封闭环境共同控制了珠一坳陷优质烃源岩的发育。

**关键词:** 优质烃源岩; 发育模式; 古环境; 古湖泊; 无机地球化学; 珠一坳陷

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021110901

## Environmental reconstruction for the paleo-lake of Zhu I depression and the depositional model for high-quality source rocks

XIE Shiwen, WANG Yuchen, SHU Yu, WU Yuxiang, ZHANG Lili, LIU Dongqing, WANG Fei

Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518067, China

**Abstract:** High-quality source rocks are well occurred in the Paleogene lacustrine deposits of the Zhu I depression. Element geochemistry and isotope analysis for mudstone cuttings from the Wenchang Formation and Enping Formation is carried out by this paper in order to optimize the study of element content and elements ratio which are sensitive to paleoenvironment reconstruction. Paleoenvironmental parameters for the source rocks in Zhu I depression are systematically analyzed, which include paleosalinity, paleowater depth, redox conditions, paleoclimate, degree of environmental closure and so on. Upon the basis, we revealed the quantitative relationship between the organic matter content and the ratio of environmental sensitive elements, and established the depositional model for the high-quality source rocks in the Wenchang Formation. The results show that under the warm and slightly dry climate conditions during the Wenchang period, the Zhu I depression was a medium to deep and open to semiclosed lake dominated by fresh water and brackish water under a reductive or strongly reductive environment, which was conducive to the preservation of organic matter and the formation of high-quality source rocks. The quality of source rocks is positively related to salinity, water depth and reduction conditions. In conclusion, in a warm and slightly dry lake with slightly salty deep water as the Zhu I depression, the strong reduction and open-semiclosed environment jointly control the development of high-quality source rocks in Zhu I depression.

**Key words:** high-quality source rocks; development model; paleoenvironment; paleo-lake; inorganic geochemistry; Zhu I depression

古湖泊学的研究对陆相生油湖盆的油气勘探起到了重要作用<sup>[1-4]</sup>。通常, 构造湖泊发育时间长, 范围大, 且大量有机质(藻类)伴随陆源碎屑岩沉

积, 发育丰富的烃源, 比较容易形成含油盆地。但并非所有构造湖盆的油气资源都相同, 湖盆的构造沉降和差异性活动控制了湖盆的基本形态和水深

资助项目: 国家科技重大专项“珠一坳陷古湖泊演化与富烃凹陷优选”(2016ZX05024-002-008); 海油重大生产科研项目“珠江口盆地(东部)浅水区古近系油气成藏条件及勘探突破方向”(SCKY-2020-SZ-21)

作者简介: 谢世文(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事油气地质研究, E-mail: xieshw@cnooc.com.cn

通讯作者: 舒誉(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事油气勘探研究, E-mail: shuyu@cnooc.com.cn

收稿日期: 2021-11-09; 改回日期: 2021-12-29. 周立君编辑

变化,物源、水系及气候条件控制了湖盆的有机质来源、沉积环境以及湖底的氧化还原性,这都将影响湖盆的烃源岩发育模式和油气勘探潜力。近几年,不少学者通过湖盆构造、气候演化对含油气盆地烃源岩发育模式进行探讨,比较具有代表性的烃源岩发育模式有:大型深水缺氧模式、咸化模式、碱性湖泊模式等<sup>[5-7]</sup>。南海北部珠江口盆地珠一坳陷古近纪发育大型的裂谷古湖泊群,朱伟林<sup>[1]</sup>认为珠一坳陷始新世湖盆面积大,湖水深,接受了大量泥岩沉积,发育生油岩。施和生等<sup>[8]</sup>通过大量的三维地震解释和地化分析,认为珠一坳陷发育长期欠补偿的古湖盆,湖盆生产力高,且具有缺氧的底层水体,容易形成优质烃源岩。前人已从有机地球化学的角度对珠一坳陷烃源岩的空间展布及生烃潜力做了较多的研究,而对湖盆水介质、古气候条件以及古环境与烃源岩的相关性缺乏研究。本文通过元素地球化学分析、TOC(总有机碳含量)以及沉积充填分析,研究珠一坳陷始新世古湖盆演化过程的水介质、古气候、古生产力以及有机质保存条件,进而探讨珠一坳陷不同地区烃源岩的差异以及优质烃源岩的发育模式,为研究区(潜在)烃源岩评价提供地质依据。

## 1 地质背景

珠江口盆地位于华南大陆南缘,受三大板块(太平洋板块、印度洋板块以及欧亚板块)交汇作用影响,处在复杂的大陆动力学背景,是在古生代及中生代复杂褶皱基底上形成的新生代含油气盆地<sup>[9]</sup>。珠一坳陷是盆地北部坳陷带的一个负向构造单元,其内部由西向东可依次划分为阳江东凹、恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷、韩江凹陷,以及海丰隆起和惠陆低凸起两个正向构造单元(图1a)。始新世珠一坳陷各凹陷内由于受到NE向为主要应力方向的构造运动控制,以及NE与NW向共轭断裂的影响,形成了一系列地堑、半地堑,这些地堑和半地堑构成珠一坳陷基本的湖盆单元<sup>[10]</sup>。湖盆演化过程中,共发育两个完整的裂陷旋回,分别形成了文昌组和恩平组<sup>[11]</sup>。每个裂陷旋回均由湖盆裂陷初期、裂陷高峰期和萎缩期组成,构成一个完整的沉积充填演化序列(图1b),裂陷高峰期发育优质烃源岩,泥岩背散射主要表现为富有机质纹层状、分散状特征(图1c-d),这充分体现了多幕裂陷旋回的构造与沉积特点。文昌期(裂陷I幕)盆内隆凹相间,凹陷分割性强,物源以盆内物

源为主,断陷湖盆快速沉降造成湖盆内部较大的可容空间和欠补偿至半补偿条件,从而在沉降中心形成了较厚的半深湖—深湖相,发育多套烃源岩,为珠一坳陷主要的生油层系<sup>[12]</sup>。沉积中心与深洼受NWW和NE两组断裂联合控制,在断裂陡坡带与构造转换带发育一系列扇三角洲与辫状河三角洲,洼陷中心局部地区发育重力流砂体;恩平期(裂陷II幕,断拗过渡期),沉积古地貌开始变得较为平缓,除一些大的隆起外,多数小隆起被湖水淹没成为水下浅滩,物源以盆外区域物源为主,盆内局部物源为辅,盆内发育广泛的滨浅湖,在构造转换带发育大型辫状河三角洲或浅水三角洲。两期裂陷旋回由不同充填样式的层序构成,其物源体系、砂体性质、水体的富营养程度、有机质的埋藏与保存条件差异明显。

## 2 样品来源与测试

本次分析化验样品来自珠江口盆地(东部)古近系文昌组钻井岩屑样,样品岩性主要为厚度大于20 m的灰黑色泥岩、深灰色泥岩和灰色泥岩,样品点分布如图1a所示,共23口井(其中阳江-恩平地区1口井、西江凹陷4口井、惠州凹陷4口井、陆丰凹陷14口)的412个样品。采用美国热电公司的多通道电感耦合等离子光谱仪(MC-ICP-MS)、同位素质谱仪(MAT-253)进行样品的同位素测定,样品测试由同济大学海洋地质国家重点实验室及中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油实验中心深圳实验中心承担。其中主量元素Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、P、Ti、Mn使用电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES)进行测试,在测试过程中,采用国际单元素标准建立工作曲线,每个元素的工作曲线的相关性均在0.99999以上,Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、Mn的相对标准偏差(RSD)小于0.5%,元素P的相对标准偏差(RSD)小于1%。测试功率为1150 W,进样速度为75 rpm、1.39 mL/min,雾化器压力为18.0 PSI,辅助气流量为0.5l pm。

微量元素、稀土元素使用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测试,在测试过程中,采用国际多元素标准建立工作曲线,每个元素的工作曲线的相关性均在0.99999以上。测试过程中,用 $0.01 \times 10^{-6}$ 的内标溶液Rh对仪器的稳定性进行监控,所测元素的相对标准偏差(RSD)均小于3%。测试功率为1300 W,进样速度为1.0 mL/min,采样深度110 mm,采样锥孔径为1.1 mm。

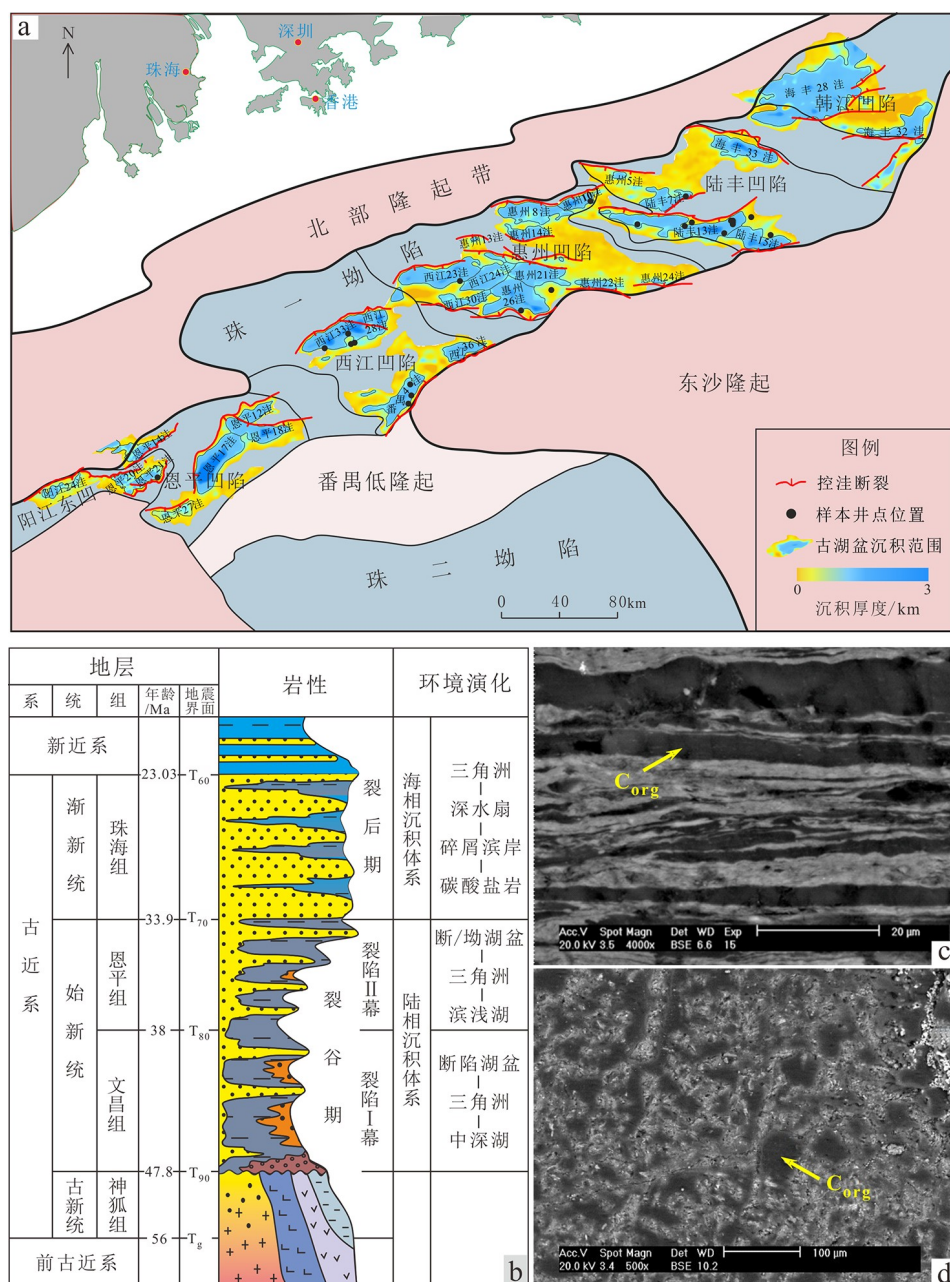


图 1 珠一坳陷地质背景纲要图

a. 珠一坳陷构造区划图, b. 珠一坳陷地层柱状图, c. 珠一坳陷纹层状烃源岩背散射图, d. 珠一坳陷分散状烃源岩背散射图。  
黄色箭头所指为有机碳。

Fig.1 Outline of geological background of Zhu I depression

a. Tectonic map, b. stratigraphic column, c. laminated source rock, d. dispersed source rock. Note: the yellow arrow indicates organic carbon.

### 3 湖盆古环境恢复

#### 3.1 古盐度

对古水介质盐度进行判定的方法众多, 在不同盐度条件下, 沉积物的元素分配及其同位素的组成有所差异, 因此, 无机地球化学指标可作为古盐度恢复的重要方法与手段<sup>[13]</sup>, 主要有 B/Ga 法、Sr/Ba

法、Z 值(碳氧同位素  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ )法等。

由于 B 主要吸附于黏土矿物, 其活动性较强, Ga 则在风化作用形成的黏土矿中大量富集, 当  $B/Ga < 1.5$  时为淡水相,  $5 \sim 6$  为近岸相,  $> 7$  为海相<sup>[14]</sup>; 据研究, Rb/K 比值随盐度而变, 正常海水中该比值大于 0.006, 微咸水比值大于 0.004, 河流淡水比值为 0.0028<sup>[15]</sup>; Sr、Ba 元素化学性质相近, 但 Sr 的迁移能力强, 因此更容易富集在海水介质中。一般认为当  $Sr/Ba > 1$  为咸水海相环境, 当  $Sr/Ba < 1$  为淡水

陆相环境<sup>[16]</sup>。Keith等<sup>[17]</sup>在对侏罗纪以来沉积的海相灰岩和淡水灰岩数百个样品的碳氧同位素测定的基础上提出盐度恢复的经验公式： $Z=2.048(\delta^{13}C+50)+0.498(\delta^{18}O+50)$ 。Z值大于120时为咸水，小于120时为淡水。另外，Mg/Ca值也可以用于反映古盐度相关信息：Mg/Ca值越大，盐度越大(表1)。

由于测试样品不均匀分散在珠一坳陷各洼陷周边(图1a)，大多数次洼没有样本点，不能逐个研究每个次洼，本次研究尝试分凹陷级别讨论古环境参数(下同)。对于古盐度，一般认为，Z值法(同位素法)对盐度的变化具有较好的指示作用，值越大，盐度越大。而珠一坳陷Rb/K、Sr/Ba等指标与Z值有较为一致的变化趋势，因此优选出Rb/K、Sr/Ba为研究区古盐度恢复指标。从恢复结果来看(图2)，除HZ26井3626~4613m处有13个样本点Sr/Ba>1外(录井显示为玄武岩，为受火山影响，采用剔除处理)，其余样本Sr/Ba<0.6，为典型陆相湖盆特征。Rb/K值平均为0.0047，个别点大于0.006，由此可以确定珠一坳陷文昌组湖盆水体介质整体为淡水—微咸水，惠州凹陷咸度最大，各凹陷间整体差异不大。

### 3.2 古水深

古水深恢复通常用沉积学分析法、地球化学标志法、古生物学法以及利用地震剖面恢复的古斜坡形态进行估算<sup>[18]</sup>。其中地球化学标志法主要是根

据各种元素的离岸(即水深)分布规律以及迁移能力的差异来展开定性判别，如Fe的高含量指示离岸近的浅水环境，Mn的高含量指示离岸远的相对深水环境<sup>[19]</sup>。本次研究主要建立研究区对古水深变化反映灵敏的地球化学指标，进行多个指标综合，进行古水深的量化恢复。现代沉积元素地球化学研究表明，当水深小于2000m时，m值(MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>×100)有随水深增加而变小的规律<sup>[20]</sup>，Mn/Fe是随着水深的增加而增加。

由于样本点取自钻井岩屑，且钻井基本都位于洼陷周边的隆起，因此古水深恢复不能代表古湖盆的最大深度，但可以反映古湖盆的相对水深。从恢复结果来看(图3)，珠一坳陷各凹陷Mn/Fe和m值差异较小，惠州凹陷m值均值略小，反映水深较大。

### 3.3 古氧相

沉积岩的特定微量元素分布特征可指示古水质的氧化-还原条件，通常利用Th/U、V/(V+Ni)来反映其特征。Th<sup>4+</sup>与U<sup>4+</sup>关系密切，其硅酸盐和氧化物构造类型相同，常呈类质同象置换，且Th<sup>4+</sup>化学性质相对稳定，U<sup>4+</sup>则容易氧化为易溶的U<sup>6+</sup>而造成U的迁移和流失，因此可以用Th/U来表示沉积水体的氧化还原条件<sup>[21]</sup>。一般认为，Th/U<4代表强还原环境，Th/U值为4~10代表还原环境，Th/U值为10~30代表弱还原-氧化环境，Th/U值>30代表氧化环境<sup>[22]</sup>。Emerson<sup>[23]</sup>指出在还原条件下，V比

表1 珠一坳陷文昌期湖盆古盐度重建指标及其指示意义

Table 1 Reconstruction index of paleosalinity for Wenchang Formation in Zhu I depression and its implications

判别指标	淡水	微—半咸水	咸水
B/Ga	<1.5	5~6	>7
Rb/K	<0.004	0.004~0.006	>0.006
Sr/Ba		<0.6为陆相，>1为海相	
Z值	<120	-	>120

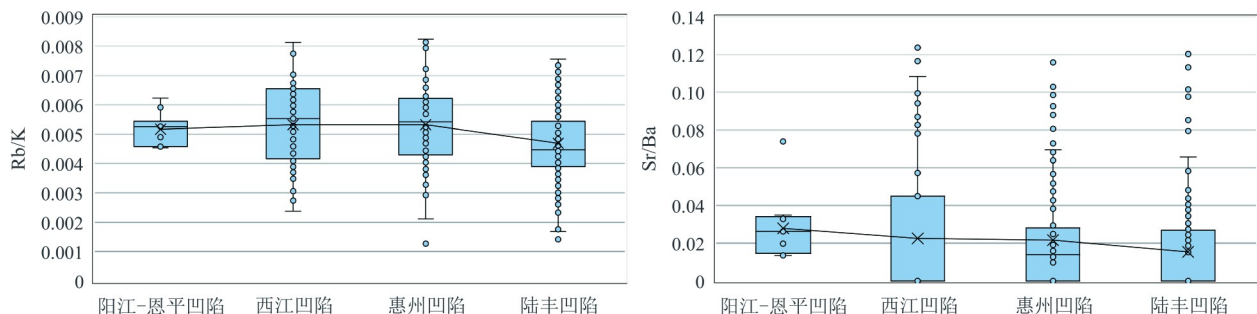
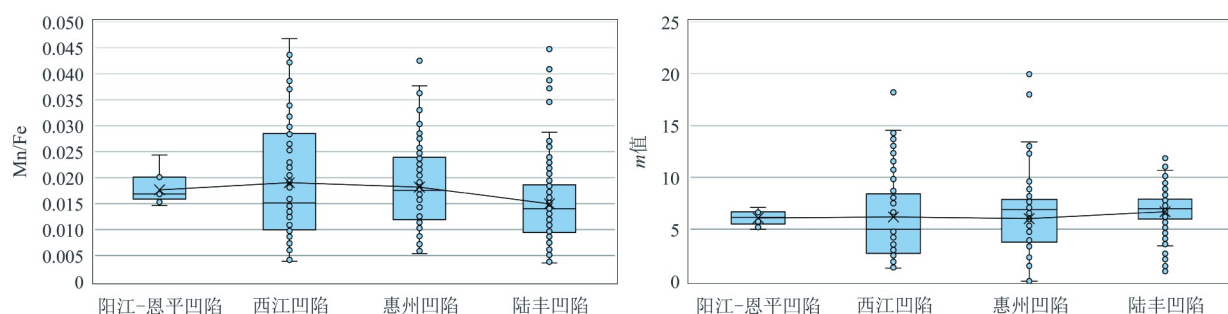


图2 珠一坳陷文昌期湖盆古盐度恢复参数(Rb/K, Sr/Ba)箱线图

Fig.2 Box diagram of paleosalinity restoration for Wenchang Formation in Zhu I depression using element parameters Rb/K and Sr/Ba

图 3 珠一坳陷文昌期湖盆古水深恢复参数 (Mn/Fe,  $m$  值) 箱线图Fig.3 Box diagram of ancient water depth restoration for Wenchang Formation in Zhu I depression using element parameters Mn/Fe and  $m$  value

Ni 以更有效的有机络合物形式沉淀(富集),  $V/(V+Ni)$  值可指示水体氧化还原条件。一般将  $V/(V+Ni)$  小于 0.46 划为氧化环境, 0.46~0.60 划为贫氧环境, 大于 0.60 则划为还原环境。Cu、Zn 是铜族元素, 在沉积作用过程中, 可因介质氧逸度的不同而产生分离, 即 Cu/Zn 比值随介质氧逸度的升降而变化。Cu/Zn 值 < 0.21 代表强还原环境, Cu/Zn 值 0.21~0.38 代表还原环境, Cu/Zn 值为 0.38~0.63 代表弱还原到氧化环境, Cu/Zn 值 > 0.63 代表氧化环境<sup>[24]</sup>(表 2)。另外, 由于草莓状黄铁矿形成并沉积后不受成岩作用及后期风化作用影响, 能保存其原来的形态大小, 被普遍认为是趋向还原环境的一种指示, 其粒径大小的分析能够更加详细地反映古水介质氧化-还原程度, 草莓状小粒径(平均 3~6  $\mu\text{m}$ )黄铁矿发育, 往往指示缺氧还原条件, 大粒径自形晶黄铁矿多指示氧化条件<sup>[25]</sup>。

无定型有机质含量及有机地化 Pr/Ph 值可准确指示古氧相的变化<sup>[26]</sup>, 通过珠一坳陷无定型有机质含量、Pr/Ph 值与元素比值的变化趋势类比, 认为 Th/U、Cu/Zn 可指示研究区古氧相的变化。从这两个参数的箱线图来看(图 4), Th/U 均小于 6, Cu/Zn 也基本小于 0.38, 泥岩背散射图像也显示草莓状黄铁矿为小粒径(平均 < 6  $\mu\text{m}$ )(图 1c), 因此, 可以认为珠一坳陷古湖盆整体为还原—强还原的环境, 这有利于有机质的保存和优质烃源岩的发育。惠州凹陷和西江凹陷古湖盆还原性相对最强, 阳江、恩平地区由于样本点少, Th/U 和 Cu/Zn 变化趋势相

反, 数据仅供参考。

### 3.4 古气候

古气候的研究通常可以借助岩石颜色与岩性、黏土矿物、古生物化石以及地球化学等多项指标进行分析。对于地化指标而言, 由于元素性质和迁移能力具一定差异, 一些元素的比值能较好反映气候的变化。Lerman<sup>[27]</sup>认为 Sr/Cu 值为 1.3~5.0 时为温湿气候, 大于 5.0 时为干热气候。通常, 由于湖泊水体中含 Ca 盐类的溶解度相对较低, 在早期即沉淀析出, 而含 Sr 的盐类溶解度相对较大, 之后才析出。因此, Sr/Ca 比值上升表明湖水盐度增加, 气候干旱, 蒸发强烈, 比值下降则表明气候湿润, 降雨增加。Mg/Ca 比值对古气候的变化也非常敏感, Mg/Ca 高值指示干旱气候, 低值反映潮湿气候<sup>[28]</sup>。Rb 的离子半径较大, 吸附性较强, 容易被黏土矿物吸附而保留下来, 而 Sr 的离子半径较小, 容易被地表水或者地下水带走, 因此, Rb/Sr 值的大小可以反映淋溶程度, 即降雨量的大小或干湿气候<sup>[29]</sup>。另外, 黏土矿物中的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$  比值变化也可反映沉积过程中古气候环境, 其值越大, 表明水体淡化, 反映温湿气候; 值越小, 则表明干旱气候<sup>[30]</sup>(表 3)。

吴国璋等<sup>[31]</sup>通过古生物种属分析, 认为珠江口盆地文昌期为温暖略干气候, 恩平期为温湿气候。从文昌组元素地化指标来看(图 5), Sr/Cu 主要分布于 3.33~7.19, 与古生物气候分析的结果较为一致, 表现为温暖略干气候。Sr/Cu 与 Rb/Sr 显示珠一坳

表 2 珠一坳陷文昌期湖盆古氧相重建指标及其指示意义

Table 2 Reconstruction index of paleooxygen facies for Wenchang Formation in Zhu I depression and its indicative significance

判别指标	氧化环境	弱还原—氧化	还原环境	强还原环境
Th/U	>30	10~30	4~10	<4
$V/(V+Ni)$	<0.46	0.46~0.60	>0.60	-
Cu/Zn	>0.63	0.38~0.63	0.21~0.38	<0.21

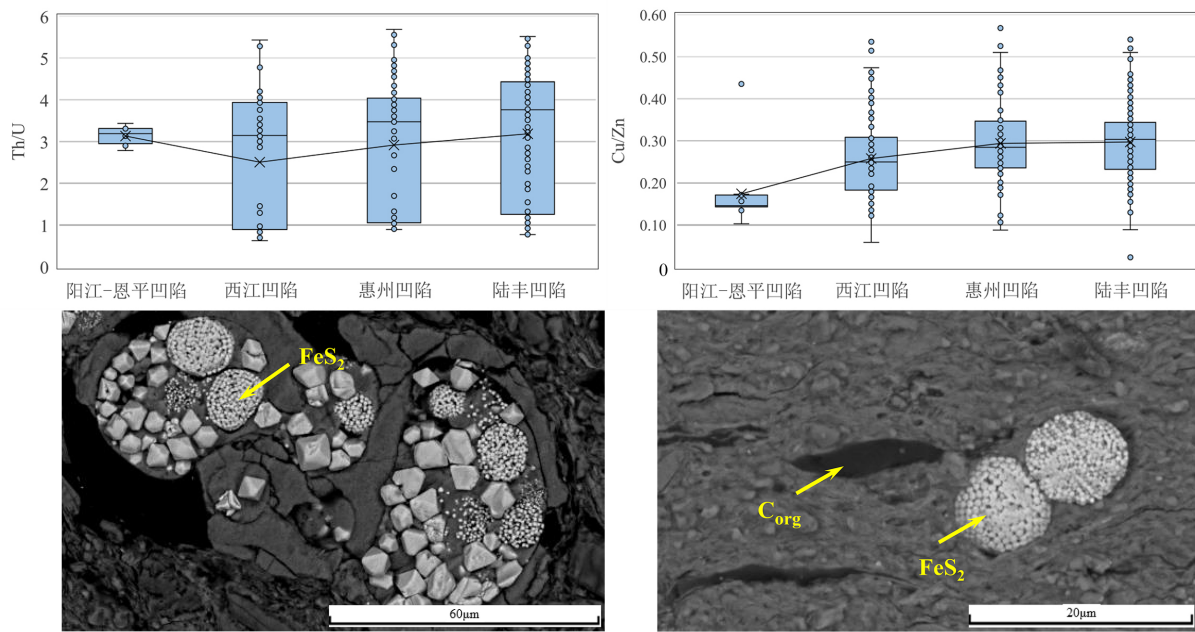


图4 珠一坳陷文昌期湖盆古氧相恢复、元素参数(Th/U, Cu/Zn)箱线图及烃源岩镜下小粒径黄铁矿特征

Fig.4 Box diagram of paleoxygen facies restoration for Wenchang Formation in Zhu I depression using element parameters Th/U and Cu/Zn, and microscopic characteristics of fine pyrite in source rocks

陷各凹陷气候差异较小,但自西往东气候更为温湿。

### 3.5 封闭性

利用碳氧同位素的相关关系可以判断湖泊的开放或封闭性<sup>[32]</sup>。对于开放型淡水湖泊,碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均为负值,呈不相关或弱相关关系;封闭型咸水湖泊中,碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 通常为正值, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的相关系数一般大于0.7,湖泊封闭性越强,相关系数就越大。

本次分析将实测碳氧同位素数据投在相关图版(图6)。为便于对比将前人有关东营凹陷沙河街时期的碳氧同位素实验结果<sup>[33-34]</sup>亦投于图中;东营凹陷沙河街组样品碳、氧同位素特征反映沙河街组沉积时期是封闭咸水或半咸水湖泊;珠一坳陷古近系样品碳氧同位素与东营凹陷沙河街组样品特征差异较大。珠一坳陷恩平组样品反映了开放性湖盆的特征。文昌组碳、氧同位素虽呈弱相关,但其碳同位素值整体较恩平组高,整体接近于第二象限,并有个别样本点落在第二象限。因此,推断文昌期的湖泊开放程度不如恩平期高,上文昌期湖盆环境较恩平期更为封闭。

## 4 古环境对烃源岩的影响

烃源岩的质量与湖盆的古生产力密切相关。

表3 珠一坳陷文昌期湖盆古气候重建指标及其指示意义  
Table 3 Reconstruction index of paleoclimate in Zhu I depression for Wenchang Formation and its indicative significance

判别指标	低值	高值
Sr/Cu	1.3~5.0, 温湿	>5, 干热
Sr/Ca	温湿	干热
Mg/Ca	潮湿	干旱
Rb/Sr	干燥	湿润
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO	干旱	湿润

古生产力一般主要指浮游生物在单位面积、单位时间内所产生的有机质的量<sup>[35]</sup>。通常,湖泊的初级生产力主要取决于浮游生物的产率,其受控于盆地的光照率和富营养元素的供应,同一个纬度带的湖泊光照率差别不大,这时生产力的高低关键在于营养物的输入,而营养物质主要受控于地质条件(湖盆大小、水深等)和风化类型。如果气候暖湿,化学风化作用强烈,而且供源岩石多为富含营养元素的花岗岩或流纹岩之类,就会向湖泊提供更多的营养物质,湖泊初级生产力可能升高;如果沉积物中全系碎屑物和陆源植物有机质,则湖盆藻类可能欠发育,初级生产力将大大降低。另外,湖盆水体始终处于大气降水(含河流注入)和蒸发作用的平衡体系中,如富营养元素供给充足,且蒸发大于淡水注入,则导致水体浓缩而咸化,已有研究认为优质烃

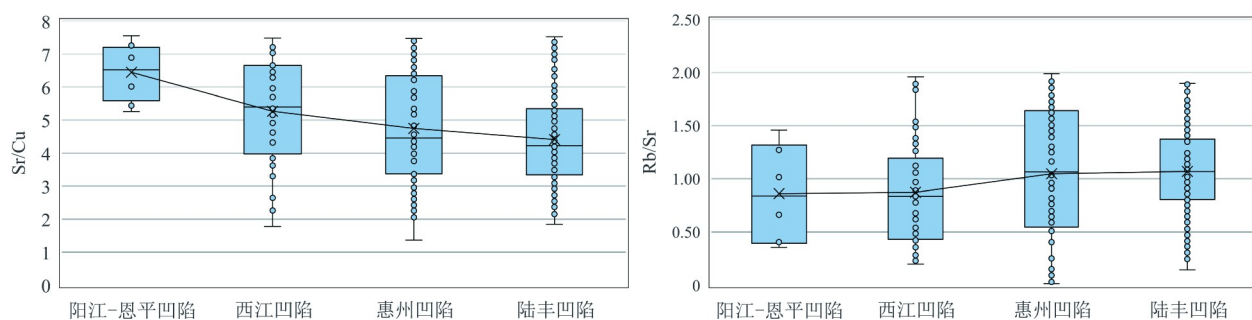
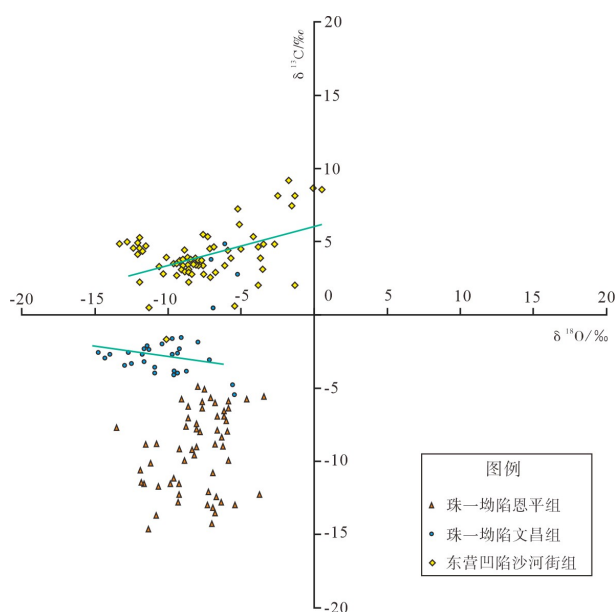


图 5 珠一坳陷文昌期湖盆古气候恢复参数 (Sr/Cu, Rb/Sr) 箱线图

Fig.5 Box diagram of paleoclimate restoration for Wenchang Formation in Zhu I depression using element parameters Sr/Cu and Rb/Sr

图 6 珠一坳陷文昌组、恩平组及东营凹陷沙河街组 (数据引自文献 33-34) 无机碳、氧同位素  $\delta$  值交汇图Fig.6 Intersection diagram of inorganic Carbon and oxygen isotopes  $\delta$  Value for Wenchang Formation, Enping Formation in Zhu I depression and Shahejie Formation in Dongying depression (data from reference 33 and 34)

源岩的形成与湖盆咸化作用有关<sup>[36]</sup>。因此,“咸化”在某种程度上可作为研究湖盆营养程度的一个指标,也是初始生产力的一项参数。然而,湖泊表层生产力和湖底沉积中的有机质含量之间,并不存在严格的线形关系。主要原因是浮游生物在水体中沉降和在水底埋葬的过程,都可以随时被自由氧氧化而分解。这就与其保存条件有关,而湖水的含氧量(古氧相)随温度和盐度而变:温度越高,盐度越高,湖水中氧的溶解度均下降。通常认为,热带咸水湖最有利于有机质的保存<sup>[37]</sup>。

珠一坳陷古近系优质烃源岩的生油母质以浮游藻类为主<sup>[8]</sup>。文昌组裂陷—沉积时期,隆凹相间,东沙隆起、番禺低隆起与盆内基岩凸起是富烃凹陷

的主要物质来源,其基底岩性主要是中生代中酸性侵入岩、沉积岩。这些中酸性火成岩母岩不仅是盆内辫状河三角洲、扇三角洲与重力流砂体的供源体,而且其风化后还可为湖盆藻类的发育提供丰富的营养物质(如 Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Ni 等),有利于浮游藻类的生长发育。因此地表径流与盆内水体是富营养的,烃源岩发育时期藻类勃发,古生产力高,利于文昌组沉积时期优质烃源岩的发育。同时与火山岩、火山碎屑岩相关的地下水富含丰富的矿物质,为微生物、水生生物繁盛提供了良好条件。已有钻井揭示珠一坳陷有些优质烃源岩本身就含有大量火山灰和海相沟鞭藻,表明优质烃源岩的发育及其藻类含量与火山活动、海侵咸化密切相关(图 7)。从古环境与总有机碳含量(TOC)的相关性(图 8)可以看出,珠一坳陷古湖盆微咸条件下,烃源岩质量与咸度、水深、还原性呈正相关,整个盆地古气候差异不大,文昌组温暖略干气候利于优质烃源岩发育。

## 5 优质烃源岩发育模式

优质烃源岩通常有机质丰度高、分布稳定(厚度不一定大),它是形成大中型油田的物质基础<sup>[38-39]</sup>。有机质富集首先要求水体表层初级生产力高,即藻类等生物繁盛,这是湖泊优质烃源岩发育的物质基础。而影响藻类富集的主要因素为湖泊水体中富营养元素的含量,花岗岩等中酸性母岩、火山喷发等地质事件可为富营养元素提供来源。有机质富集的另外一方面就是有机质的保存,主要受控于底部水体氧化还原条件,是有机质生成后能否被有效保存而不被氧化(分解)的关键因素。这两大控制因素——表层初级生产力和有机质的保存在一定程度上可通过地球化学等诸多指标进行表征古湖泊沉积水体的生态系统及物理-化学条件,这也是评价



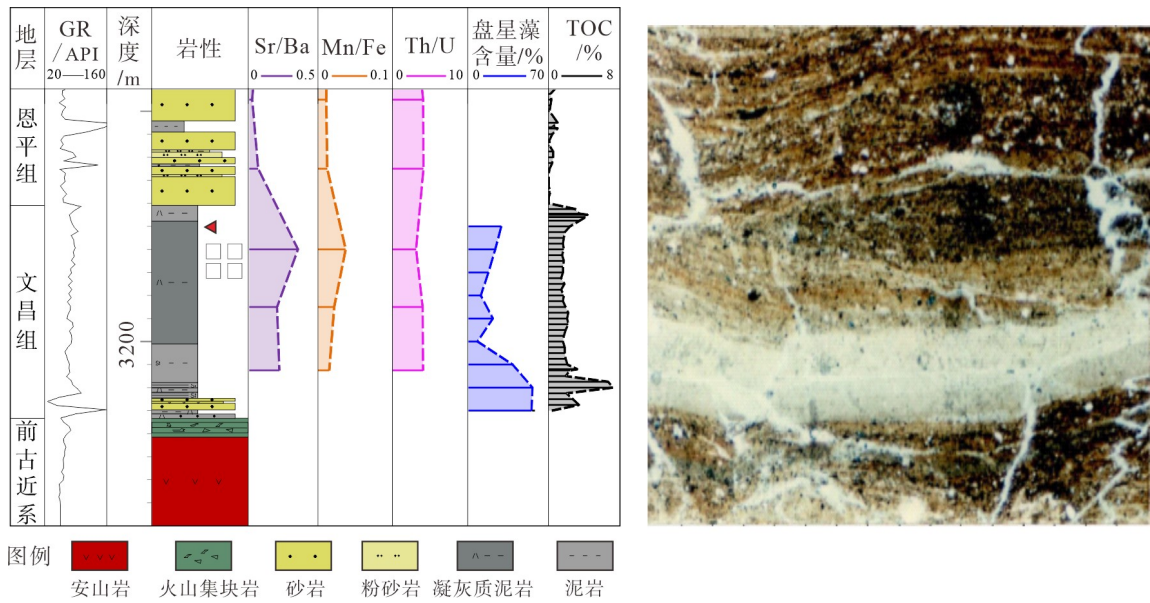


图7 珠一坳陷文昌组地层特征及凝灰质泥岩显微照片

Fig.7 Geochemical element stratigraphic column and micrograph of tuffaceous mudstone for Wenchang Formation in Zhu I depression

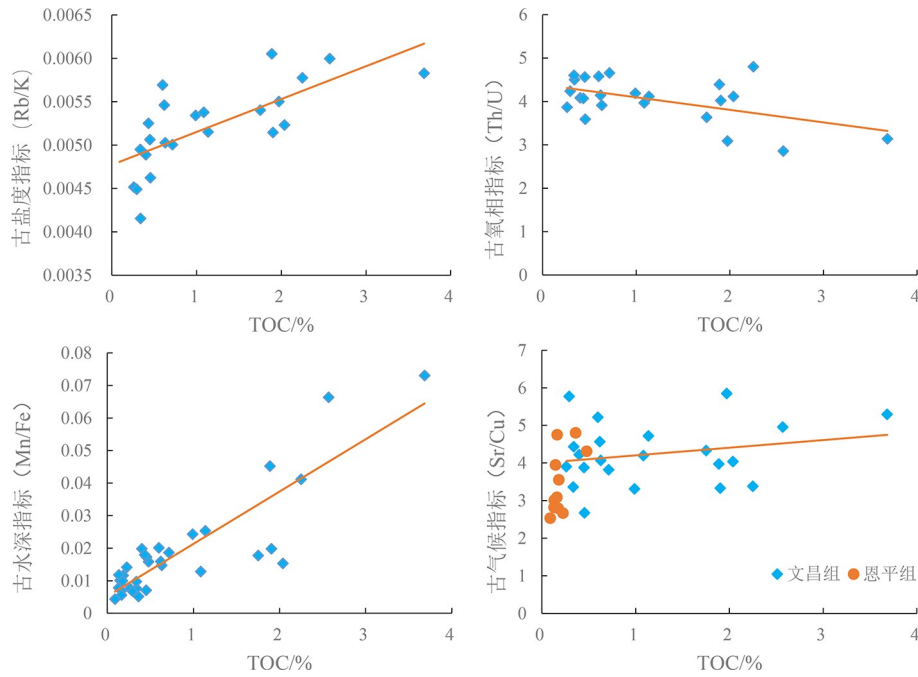


图8 珠一坳陷古环境与烃源岩质量相关性分析

Fig.8 Correlation analysis between paleoenvironment and source rock quality in Zhu I depression

和探讨古湖泊生烃潜力和资源量的一种有效手段。

前已述及,温暖略干、微咸、深水及强还原、开放-半封闭环境共同控制了珠一坳陷古湖盆优质烃源岩的发育,根据盆地文昌组烃源岩形成的构造、环境要求,结合主微量元素推测的古湖盆氧化还原条件及古生产力特征,总结出研究区优质烃源岩发育的模式为(图9):①湖盆裂陷高峰期,受边界断层控制,构造沉降大,造就了湖盆欠补偿的水深条件。其沉积中心多靠近洼陷边界断层,整体形态多

呈楔形体,多为中深湖沉积环境,具备优质烃源岩的构造发育条件;②在温暖略干气候下,盆间花岗岩风化剥蚀,地表径流经物源区母岩,把粗碎屑物带入湖盆的同时,也把母岩中富集的相关元素以游离形式带入湖内,局部火山作用更是增加了富营养元素的供给量,使得湖盆表层浮游藻类(盘星藻等)勃发,古生产力高;③由于差异沉降以及盆地基底的分割作用,珠一坳陷发育多个洼陷带、沉积中心与烃源岩堆积中心。每一个洼陷自为一个相对

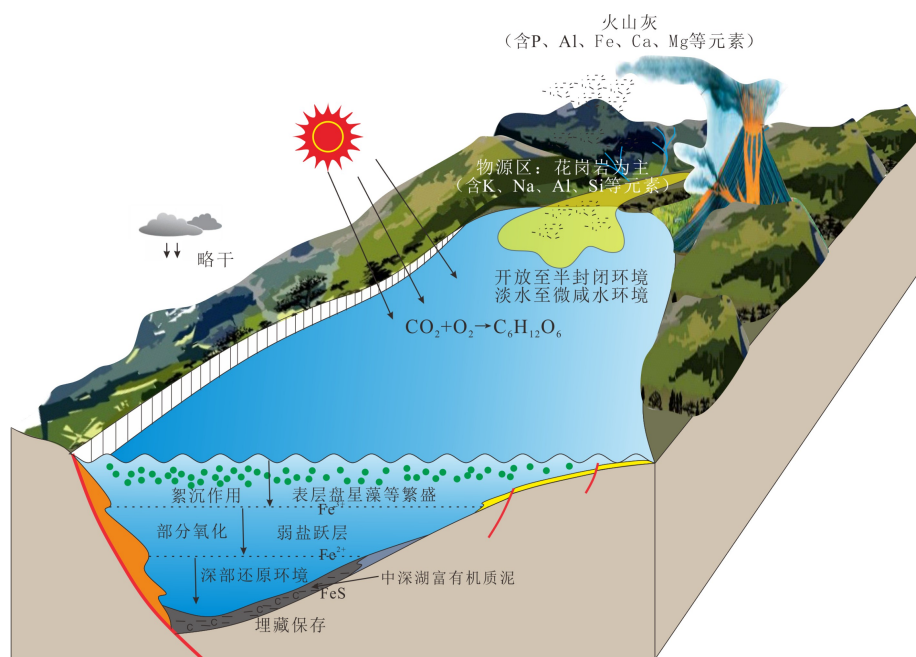


图 9 珠一坳陷优质烃源岩形成环境模式图

Fig.9 Environment model for High-quality source rocks formation in Zhu I depression

独立的沉积充填单元, 之间被低凸起相隔, 凹陷内水体循环弱, 加之湖盆水体较深, 沉积物中有机质在相对封闭弱循环的水体环境下埋藏保存, 最终形成腐泥型或偏腐泥型 (I - II 型) 的有机质类型<sup>[1]</sup>, 为优质烃源岩。

另外, 需要提及的是, 珠一坳陷控凹断裂体系的差异活动、转移与强度的变化, 不同湖盆的成盆过程有所差异, 这也将导致湖盆的物源、沉积充填、水体介质均有所差别, 从而影响富烃洼陷烃源岩的差别和贫富差别。从湖盆水介质、古气候条件分析的优质烃源岩发育模式来看, 半封闭湖盆伴随火山岩富营养水系的供给以及相对稳定的欠补偿沉积环境是研究区富烃凹陷形成的必要条件。

## 6 结论

(1) 通过无机元素地化分析主要恢复珠一坳陷文昌期湖盆古环境, 认为该时期湖盆水体介质整体为淡水—微咸水, 发育中—深湖相, 其中惠州凹陷古水深和咸度最大, 但整体差异不大。湖盆整体表现为还原—强还原的环境, 极利于有机质的保存和优质烃源岩的发育。珠一坳陷湖盆为开放—半封闭环境, 且文昌期为温暖略干气候, 恩平期为温暖潮湿气候, 由西往东气候更为温湿, 文昌期湖盆环境较恩平期更为封闭。

(2) 勘探实践表明, 珠一坳陷不同次洼构造演

化有区别、贫富差异大, 且不同次洼古环境应有差异。从古环境角度来看, 文昌期温暖略干气候利于珠一坳陷优质烃源岩的发育, 珠一坳陷湖盆水体介质在微咸条件下, 有较高的初级生产力, 火山活动及海侵作用下更是增加了古生产力。古水深、古氧相控制了后期有机质的保存条件, 因此烃源岩质量与咸度、水深、还原条件呈正相关。

(3) 温暖略干、微咸、深水及强还原、半封闭环境共同控制了珠一坳陷文昌期古湖盆优质烃源岩的发育。文昌期古湖盆在开放—半封闭条件下, 阳光充足, 陆源碎屑物质、火山灰的输入带来了大量营养物质, 导致湖盆表层水体藻类勃发, 古生产力提高, 且湖盆裂陷高峰期, 受边界断层控制, 构造沉降大, 形成湖盆欠补偿的水深条件, 底层水贫氧, 使得表层藻类产生的有机质得以很好保存, 为优质烃源岩发育模式。该模式对珠一坳陷资源潜力评价提供了重要参考价值。

## 参考文献 (References)

- [1] 朱伟林. 中国近海新生代含油气盆地古湖泊学与烃源条件[M]. 北京: 地质出版社, 2009. [ZHU Weilin. Paleolimnology and Source Rock Studies of Cenozoic Hydrocarbon-bearing Offshore Basins in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.]
- [2] Mello M R, Maxwell J R. Organic geochemical and biological marker characterization of source rocks and oils derived from lacustrine environments in the Brazilian continental margin[C]//Lacustrine Basin

- Exploration: Case Studies and Modern Analogs. Tulsa: AAPG, 1999, 50: 77-97.
- [3] Rosendahl B R, Reynolds D J, Lorber P M, et al. Structural expressions of rifting: lessons from Lake Tanganyika, Africa [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 25 (1): 29-43.
- [4] 孟庆涛, 刘招君, 胡菲, 等. 桦甸盆地始新世古湖泊生产力与有机质富集机制[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(5): 38-44. [MENG Qingtao, LIU Zhaojun, HU Fei, et al. Productivity of Eocene ancient lake and enrichment mechanism of organic matter in Huadian Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(5): 38-44.]
- [5] 吴克强, 姜雪, 孙和风. 近海富生油凹陷湖相烃源岩发育模式: 以黄河口凹陷古近系为例[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 63-70. [WU Keqiang, JIANG Xue, SUN Hefeng. Model of lacustrine source rocks in offshore oil kitchen sag: a case study of Paleogene in Huanghekou sag [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(2): 63-70.]
- [6] 马小祥, 姚素平, 张柏林, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系古湖盆氧化还原条件及其优质烃源岩的发育模式[J]. 高校地质学报, 2019, 25(6): 801-812. [MA Xiaxiang, YAO Suping, ZHANG Bolin, et al. Redox conditions of Paleogene paleolake and development models of high-quality source rocks in the Dongpu sag, Bohai Bay Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2019, 25(6): 801-812.]
- [7] 王书荣, 宋到福, 何登发. 三塘湖盆地火山灰对沉积有机质的富集效应及凝灰质烃源岩发育模式[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1077-1087. [WANG Shurong, SONG Daofu, HE Dengfa. The enrichment effect of organic materials by volcanic ash in sediments of the Santanghu Basin and the evolutionary pattern of tuffaceous source rocks [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1077-1087.]
- [8] 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.]
- [9] 刘海伦. 珠江口盆地地球一坳陷裂陷结构: 基底属性与区域应力联合制约[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2018 [LIU Hailun. Rift style controlled by basement attribute and regional stress in Zhu I depression, Pearl River Mouth basin[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences, 2018.]
- [10] 吴克强, 刘志峰, 王升兰, 等. 珠一坳陷北部洼陷带始新统半深—深湖相烃源岩综合判识[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 10-15, 24. [WU Keqiang, LIU Zhifeng, WANG Shenglan, et al. Composite recognition of eocene semi-deep and deep lacustrine facies source rocks in northern subsags belt of Zhu I depression, Pearl River Mouth basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(3): 10-15, 24.]
- [11] 高阳东, 林鹤鸣, 汪旭东, 等. 幕式裂陷控注背景下的烃源岩分布及岩浆改造——以珠一坳陷番禺4洼为例[J]. 2021, 41(4): 151-160. [GAO Yangdong, LIN Heming, WANG Xudong, et al. Source rock distribution pattern in an episodic rifting sag and later stage magmatic reformation: A case from Panyu 4 sag, Zhu I Depression[J]. 2021, 41(4): 151-160.]
- [12] 朱明, 张向涛, 黄玉平, 等. 珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 53-68. [ZHU Ming, ZHANG Xiangtao, HUANG Yuping, et al. Source rock characteristics and resource potential in Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 53-68.]
- [13] 毛光周, 刘晓通, 安鹏瑞, 等. 无机地球化学指标在古盐度恢复中的应用及展望[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2018, 37(1): 92-102, 118. [MAO Guangzhou, LIU Xiaotong, AN Pengrui, et al. Application and outlook of inorganic geochemical indexes in reconstruction of palaeosalinity [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science*, 2018, 37(1): 92-102, 118.]
- [14] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 1979(2): 51-60. [[WANG Yiyu, GUO Wenyin, ZHANG Guodong. Application of some geochemical indications in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jin-Hu Depression, Kiangsu Province [J]. *Journal of Tongji University:Natural Science*, 1979(2): 51-60.]
- [15] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 1-3. [LI Jinlong, CHEN Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(5): 1-3.]
- [16] 张金亮, 张鑫. 塔里木盆地志留系古海洋沉积环境的元素地球化学特征[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(2): 200-208. [ZHANG Jinliang, ZHANG Xin. The element geochemical features of ancient oceanic sedimentary environments in the Silurian period in the Tarim Basin [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(2): 200-208.]
- [17] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(10-11): 1787-1816.
- [18] 庞军刚, 杨友运, 郝磊. 湖盆古水深恢复研究现状综述[J]. 长江大学学报:自然科学版 理工, 2012, 9(9): 42-45. [PANG Jungang, YANG Youyun, HAO Lei. Review on the research status of ancient water depth restoration in the lake basin [J]. *Journal of Yangtze University:Natural Science Edition, Science and Engineering*, 2012, 9(9): 42-45.]
- [19] 逢淑伊, 操应长, 梁超. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段岩相特征及沉积环境——以樊页1井为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 799-809. [PANG Shuyi, CAO Yingchang, LIANG Chao. Lithofacies characteristics and sedimentary environment of Es4U and Es3L: A case study of Well FY1 in Dongying sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 799-809.]
- [20] 许中杰, 程日辉, 张莉, 等. 华南陆缘晚三叠-早、中侏罗世海平面相对升降与古气候演化的地球化学记录[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2012, 37(1): 113-124. [XU Zhongjie, CHENG Rihui, ZHANG Li, et al. The geochemistry records of sea-level relative movement and paleoclimatic evolution of the South China continental margin in Late Triassic-Early-Middle Jurassic [J]. *Earth Science:Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(1): 113-124.]
- [21] 李明龙, 陈林, 田景春, 等. 鄂西走马地区南华纪古城期-南沱早期古气候和古氧相演化: 来自细碎屑岩元素地球化学的证据[J]. 地质学报, 2019, 93(9): 2158-2170. [LI Minglong, CHEN Lin, TIAN Jingchun, et al. Paleoclimate and paleo-oxygen evolution during the

- Gucheng Period-early Nantuo Period of Nanhua system in the Zouma area, West Hubei: Evidence from elemental geochemistry of fine Clastic rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93 (9): 2158-2170.]
- [22] Jones G E. An ecological survey of open ocean and estuarine microbial populations. 1. The importance of trace metal ions to microorganisms in the sea [M]//Stevenson L H, Colwell R R. *Estuarine Microbial Ecology*. Columbia: University of South Carolina Press, 1973: 233-241.
- [23] Emerson S R, Husted S S. Ocean anoxia and the concentrations of molybdenum and vanadium in seawater [J]. *Marine Chemistry*, 1991, 34 (3-4): 177-196.
- [24] 梅水泉. 岩石化学在湖南前震旦系沉积环境及铀来源研究中的应用 [J]. *湖南地质*, 1988, 7 (3): 25-31, 49. [MEI Shuiquan. Application of rock chemistry in the study of presinian sedimentary environment and the source of uranium mineralization in Hunan province [J]. *Hunan Geology*, 1988, 7 (3): 25-31, 49.]
- [25] 田涛, 付德亮, 周世新, 等. 米仓山-汉南隆起区牛蹄塘组页岩古氧相及其与有机质富集的关系 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2020, 56 (1): 37-47, 55. [TIAN Tao, FU Deliang, ZHOU Shixin, et al. The paleo-redox conditions of the shale in Niutitang formation and its effects on organic matter enrichment of the Micangshan-Hannan Uplift [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2020, 56 (1): 37-47, 55.]
- [26] 刘莹, 展翅飞. 探究影响Pr/Ph值的地质因素及其生烃演化 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2014 (5): 203-203. [LIU Ying, ZHAN Chifei. Explore the geological factors affecting Pr/Ph and its hydrocarbon generation evolution [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2014 (5): 203-203.]
- [27] Lerman A, Imboden D M, Gat J R. *Physics and Chemistry of Lakes* [M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995.
- [28] 石军, 邹艳荣, 余江, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组高有机碳页岩发育的古环境 [J]. *天然气地球科学*, 2018, 29 (8): 1138-1150. [SHI Jun, ZOU Yanrong, YU Jiang, et al. Paleoenvironment of organic-rich shale from the Lucaogou Formation in the Fukang Sag, Junggar Basin, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29 (8): 1138-1150.]
- [29] 戴贤铎, 杜远生, 马千里, 等. 秭归盆地峡口剖面中侏罗统千佛崖组古气候演化的地球化学记录 [J]. *地质科技情报*, 2018, 37 (2): 50-58. [DAI Xianduo, DU Yuansheng, MA Qianli, et al. Palaeoclimate change of the Middle Jurassic Qianfoya formation revealed by geochemical records of Xiakou section in Zigui Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37 (2): 50-58.]
- [30] 余素华, 文启忠, 张三士, 等. 中国西北地区晚第四纪黄土中镁铝地球化学与古气候意义 [J]. *沉积学报*, 1994, 3 (12): 112-116. [YU Shuhua, WEN Qizhong, ZHANG Shisan, et al. The geochemistry and paleoclimate significance of magnesium and aluminium in loess of late Quaternary in Northwestern China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 3 (12): 112-116.]
- [31] 吴国璋. 珠江口盆地东部古近系沉积环境及烃源研究 [R]. 同济大学内部科技报告, 2007. [WU Guoxuan. Study on Paleogene Sedimentary Environment and Hydrocarbon Sources in the Eastern Pearl River Basin [R]. Tongji University, Internal technology report, 2007.]
- [32] Talbot M R. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1990, 80 (4): 261-279.
- [33] 刘庆. 渤海湾盆地东营凹陷烃源岩碳氧同位素组成及地质意义 [J]. *石油实验地质*, 2017, 39 (2): 247-252. [LIU Qing. Composition and geologic significance of carbon and oxygen isotopes in hydrocarbon source rocks, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39 (2): 247-252.]
- [34] 刘传联. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及其古湖泊学意义 [J]. *沉积学报*, 1998, 16 (3): 109-114. [LIU Chuanlian. Carbon and oxygen isotopic compositions of lacustrine carbonates of the Shahejie formation in the Dongying depression and their paleolimnological significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16 (3): 109-114.]
- [35] 孙莎莎, 姚艳斌, 吝文. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区油页岩元素地球化学特征及古湖泊水体环境 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34 (3): 642-645. [SUN Shasha, YAO Yanbin, LIN Wen. Elemental geochemical characteristics of the oil shale and the paleo-lake environment of the Tongchuan Area, Southern Ordos Basin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34 (3): 642-645.]
- [36] 金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32 (4): 19-23. [JIN Qiang, ZHU Guangyou, WANG Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2008, 32 (4): 19-23.]
- [37] Katz B J. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks-An update [J]. *AAPG Studies in Geology*, 1995, 40: 61-79.
- [38] 秦建中. *中国烃源岩* [M]. 北京: 科学出版社, 2005. [QIN Jianzhong. *Source Rocks in China* [M]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [39] 王建, 王权, 钟雪梅, 等. 二连盆地优质烃源岩发育特征及成藏贡献 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37 (5): 641-647. [WANG Jian, WANG Quan, ZHONG Xuemei, et al. Characteristics of high-quality hydrocarbon source rocks and their contributions to reservoirs in the Erlian Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2015, 37 (5): 641-647.]