

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020042101

珠江口盆地白云凹陷恩平组泥岩元素地球化学特征及环境指示意义

石创^{1,2}, 龙祖烈^{1,2}, 朱俊章^{1,2}, 姜正龙³, 黄玉平^{1,2}

1. 中海石油深海开发有限公司, 深圳 518054

2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054

3. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

摘要:泥岩的元素特征对沉积环境变化有较高的灵敏度,能够较好地保存原始沉积记录。为了明确白云凹陷恩平组烃源岩发育环境,选取凹陷内 5 口钻井泥岩样品进行元素测试。利用元素地球化学方法,系统分析白云凹陷各洼陷恩平期古水深、古氧相、古气候、古盐度和埋藏效率等古环境指标,结果表明:白云西洼处于水深较深、气候偏冷潮湿、还原性弱的淡水环境,埋藏效率相对最低;白云东洼处于水深较浅、气候湿热、亚还原半咸水环境,埋藏效率高;白云主洼处于水深相对最深、暖湿气候、亚还原—还原的淡水环境,埋藏效率相对中等;白云南洼处于水深总体较浅、暖湿气候、亚还原环境,咸水—半咸水—淡水均有分布,埋藏效率总体趋好。环境恢复结果显示白云主洼、白云东洼和白云南洼恩平期烃源岩的形成和保存条件较好,白云西洼相对较差。

关键词:沉积环境;元素地球化学;恩平组;白云凹陷;珠江口盆地

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

Element geochemistry of the Enping Formation in the Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin and their environmental implications

SHI Chuang^{1,2}, LONG Zulie^{1,2}, ZHU Junzhang^{1,2}, JIANG Zhenglong³, HUANG Yuping^{1,2}

1. CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen 518054, China

2. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518054, China

3. School of Marine Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The element composition of mudstone may well preserve the original sedimentary information and is highly sensitive to the changes of sedimentary environment. In order to define the depositional environment of source rocks of the Enping Formation in the Baiyun Sag, mudstone samples from 5 drilling holes were selected for analysis of element composition. Studied are such paleoenvironmental parameters as paleo-water depth, paleo-oxygenation facies, paleoclimate, paleosalinity and burial efficiency during the Enping period in the Baiyun Sag. The results indicate that the West Baiyun Sub-sag was then a deep fresh water environment under cold-wet climate, weak reducibility, and lowest burial efficiency; the East Baiyun Sub-sag was located in the partly salted water environment under shallow water depth, wet-hot climate, weak reducibility and high burial efficiency; the Main Baiyun Sub-sag is located in a fresh water environment with deep water depth, warm-wet alternative climate, weak reducibility- reducibility and moderate burial efficiency, while the South Baiyun Sub-sag was located in an environment with generally shallow water depth, warm-wet climate and sub reducing environment, where salt water, semi salt water and fresh water are all observed, and fluctuated relatively high burial efficiency. The above environmental parameters reveal that the genetic and preservative conditions of source rocks in the Main Baiyun Sub-sag, East Baiyun Sub-sag and South Baiyun Sub-sag are highly qualified and much better than those in the West Baiyun Sub-sag.

Key words: depositional environment; element geochemistry; Enping Formation; Baiyun Sag; Pearl River Mouth Basin

岩石中的元素在岩石风化、搬运和沉积过程中 使得元素的含量或不同元素间的比值出现规律性
受外部环境的影响,会发生规律性的分散和富集, 变化^[1-2]。利用沉积岩中元素含量或比值来表征古

资助项目: 十三五国家科技重大专项课题资助项目“珠江口盆地深水区古温压演化与油气生排聚过程”(2016ZX05026-003-006)

作者简介: 石创(1988—),男,硕士,工程师,主要从事资源评价、油气成藏研究工作, E-mail: shichuang@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020-04-21; 改回日期: 2020-05-25. 蔡秋蓉编辑

沉积环境变化,恢复古水深、古氧相、古气候、古盐度和埋藏效率等环境指标已在油气勘探领域广泛应用。

海上油气勘探从浅水走向深水已是必然趋势,深水盆地是当今全球油气勘探的热点区^[3]。白云凹陷主体位于珠江口盆地深水區,经过多年的勘探实践,发现多个大型油气藏,特别是荔湾 3-1 气田的发现,拉开了中国深海勘探的序幕,证实了白云凹陷的生烃潜力^[4-5]。目前,白云凹陷已发现油气分布具有“内气外油、以气为主、以油为辅”的特点^[5]。明确优质烃源岩的分布,对于寻找油气有利聚集带,指导勘探部署具有重要意义。但白云凹陷钻遇有效烃源岩钻井少,仅以单井有限样本评价凹陷烃源岩,难以揭示凹陷烃源岩全貌。针对以上问题,本文运用元素地球化学的方法研究白云凹陷烃源岩发育的沉积环境,确定烃源岩形成背景,进而为白云凹陷油气勘探提供地质依据。

1 区域地质概况

白云凹陷位于珠江口盆地中部坳陷带,是珠江口盆地规模最大、埋藏最深的沉积凹陷,水深约 200~2 800 m,总体呈 NEE 向展布,包括白云主洼、白云东洼、白云南洼和白云西洼 4 个次级洼陷^[4]。白云凹陷东侧为云荔低隆起,西侧为云开低凸起,南邻顺鹤隆起,北部与番禺低隆起相接(图 1)。凹

陷自下而上发育文昌组、恩平组和珠海组 3 套烃源岩,其中,文昌组主要发育浅湖—半深湖相沉积,恩平组主要发育河流—三角洲相沉积,同时晚期受东南部海侵影响,珠海组主要发育三角洲—滨浅海相沉积^[6]。前人应用有机地化对白云凹陷已发现油气进行分析,确定了恩平组烃源岩对白云凹陷油气成藏的贡献^[7],同时,由于钻遇文昌组烃源岩的钻井极少,珠海组烃源岩仅在白云主洼中心成熟,因此,文章选取恩平组进行元素地球化学分析。

2 样品采集与分析测试

本次研究目的是通过元素地球化学分析白云凹陷恩平组烃源岩发育环境。研究表明,泥岩粒度小对元素的吸附性能好,同时,泥岩孔隙度小,连通性差,受后期孔隙流体影响小,能够较好地保存原始沉积记录^[8]。因此,选取白云凹陷 5 口钻井共 51 个恩平组泥岩样品进行元素测试。W-1 井位于白云西洼,共 8 个样品;W-2 井位于白云东洼,共 6 个样品;W-3 井位于白云主洼,共 4 个样品;W-4 井和 W-5 井位于白云南洼,其中, W-4 井共 10 个样品, W-5 井共 23 个样品(图 1)。所有样品使用德国飞驰公司生产的 PULVERISETTE6 行星式球状研磨仪粉碎研磨至 200 目以下的粉末。常量元素测定采用荷兰帕纳科公司生产的 Axios MAX X 射线荧光光谱仪,偏差小于 0.05%。微量元素的测定采用

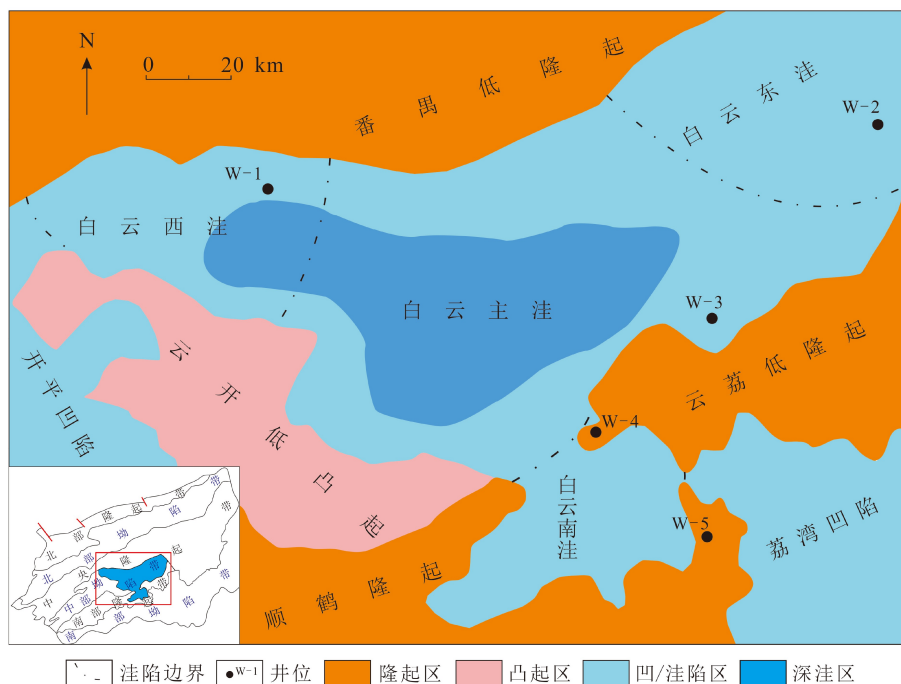


图 1 白云凹陷构造位置

Fig.1 The structural geological map of Baiyun Sag

美国赛默飞公司生产的 ELEMENT XR 等离子体质谱仪, 偏差小于 0.1%。样品处理及元素含量测试均在中国地质大学(北京)海洋学院石油地质实验室完成。

3 元素特征及环境指示意义

3.1 样品有效性分析

样品测试结果有效可靠是恢复古沉积环境的前提条件, 成岩期后的蚀变作用会影响数据判断沉积环境的准确性, 因此, 在系统分析前需要对测试数据进行有效性分析^[9]。大量研究表明, 在后期成岩作用蚀变的影响下, 容易造成沉积物中 Sr 流失和 Mn 富集, 一般认为 Mn/Sr 比值小于 10, 表明样品未遭受强烈蚀变^[9-11]。对恩平组所取的 51 个样品 Mn/Sr 比值进行统计, 最大值为 8.57, 最小值为 1.58, 平均值为 4.22, 表明样品受后期成岩作用影响较小, 能够保持原有特征, 分析结果具有一定代表性。

3.2 古沉积环境恢复

根据测试化验结果, 以元素地球化学理论为指导, 综合运用对沉积环境反映敏感的元素参数, 对白云凹陷恩平组泥岩样品进行古水深、古氧相、古气候、古盐度和埋藏效率等环境指标恢复, 明确白云凹陷恩平组烃源岩发育的沉积环境(表 1)。

3.2.1 古水深

元素地球化学研究表明, 沉积物在沉积过程中受机械分异作用、化学分异作用和生物分异作用的影响, 发生规律性的聚集和分散, 一些元素的比值对于古水深有较好的指示意义^[12]。沉积物中 Mn 和

Al 的含量具有随水深增加而增加的规律, 而 Fe 和 Mg 的含量具有随水深增加而减少的特征, 因此, 文章采用 $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 和 M 值 $((\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3) \times 100)$ 来表征水深变化, 其中, $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 随着水深的增加而增加, M 值随水深增加而变小^[10]。

W-1 井 $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 和 M 值存在波动, 总体显示水深自下而上先增加后减小; W-2 井 $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 从下到上逐渐减小, 而 M 值逐渐增加, 表明水深有减小趋势; W-3 井 M 值较稳定, $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 存在 1 个较低值, 总体显示水深变化相对较小; W-4 井和 W-5 井 $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 总体上自下而上先减小后增加, M 值变化情况则相反, 反映水深早期由深变浅, 晚期稍有增加趋势(图 2)。以 $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 为 2.5% 分界, 对比各钻井数值发现, W-3 井 $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 大于 2.5%, 其他各井 $(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$ 总体小于 2.5%, 仅 W-4 井和 W-5 井恩平组下段个别样品大于 2.5%。以 M 值为 6% 分界, 对比各钻井 M 值, 结果显示, W-1 井和 W-3 井 M 值总体小于 6%, 其他单井 M 值均大于 6%(表 1, 图 2)。两种参数分析结果表明白云主洼恩平期水深最深, 其次是白云西洼, 白云东洼和南洼水深相对较浅, 白云南洼在恩平期受东南部海侵影响^[13], 造成早期水深较深, 之后水深波动变化, 总体呈变浅趋势。

3.2.2 古氧相

沉积岩中一些元素明显受氧化还原状态的控制。氧化条件下 V 易于与沉积物结合形成沉淀, 而还原条件下 Ni 易于被吸附富集形成沉淀; Th 和 U 在还原条件下化学性质相似, 但在氧化条件下差异明显, U 在强还原状态下容易富集, 不溶于水, 在氧化状态下易溶于水。一般认为 $V/(V+\text{Ni}) > 0.84$, 代表还原、水体有分层的环境, $0.60 < V/(V+\text{Ni}) < 0.84$ 为亚还原环境, 水体分层弱, $V/(V+\text{Ni})$

表 1 白云凹陷恩平组泥岩元素分析计算
Table 1 Element composition of mudstone samples from Enping Formation in Baiyun Sag

井号	古水深		古氧相		古气候		古盐度		埋藏效率
	$(\text{Mn}/\text{Fe}) \times 100$	M 值/%	Th/U	$V/(V+\text{Ni})$	$\text{MgO}/\%$	Sr/Cu	Li/($\mu\text{g/g}$)	Ni/($\mu\text{g/g}$)	Moxs/($\mu\text{g/g}$)
W-1	1.09~2.08	4.19~6.92	3.92~6.86	0.46~0.69	0.27~1.01	1.30~3.54	2.42~21.73	1.35~5.06	0~0.38
	1.49	5.32	4.82	0.60	0.65	2.46	8.03	3.10	0.12
W-2	1.15~2.28	10.75~11.71	4.51~5.33	0.67~0.72	1.63~1.93	7.51~11.07	61.00~84.10	30.70~35.50	0.78~2.22
	1.62	11.01	4.79	0.70	1.80	9.03	71.15	33.42	1.41
W-3	2.74~3.66	5.70~5.78	3.78~4.62	0.81~0.90	1.18~1.28	4.14~11.38	18.10~89.10	4.34~19.70	0.56~0.95
	3.35	5.72	4.35	0.83	1.22	6.23	68.73	15.04	0.77
W-4	1.44~3.68	8.53~10.94	4.37~6.53	0.60~0.84	1.17~1.66	4.74~6.65	41.81~78.52	12.24~49.65	0.82~1.26
	1.90	9.30	5.32	0.79	1.46	5.29	64.86	20.81	1.01
W-5	0.74~2.56	6.55~12.62	5.01~7.98	0.53~0.81	1.29~2.83	3.28~10.60	56.33~148.00	26.29~103.21	0~4.13
	1.33	9.13	6.22	0.73	1.82	5.23	98.21	41.03	1.48

注: M 值为 $(\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3) \times 100$; Moxs为生物成因钼; 表中数据横线上为最小值-最大值, 横线下为平均值。

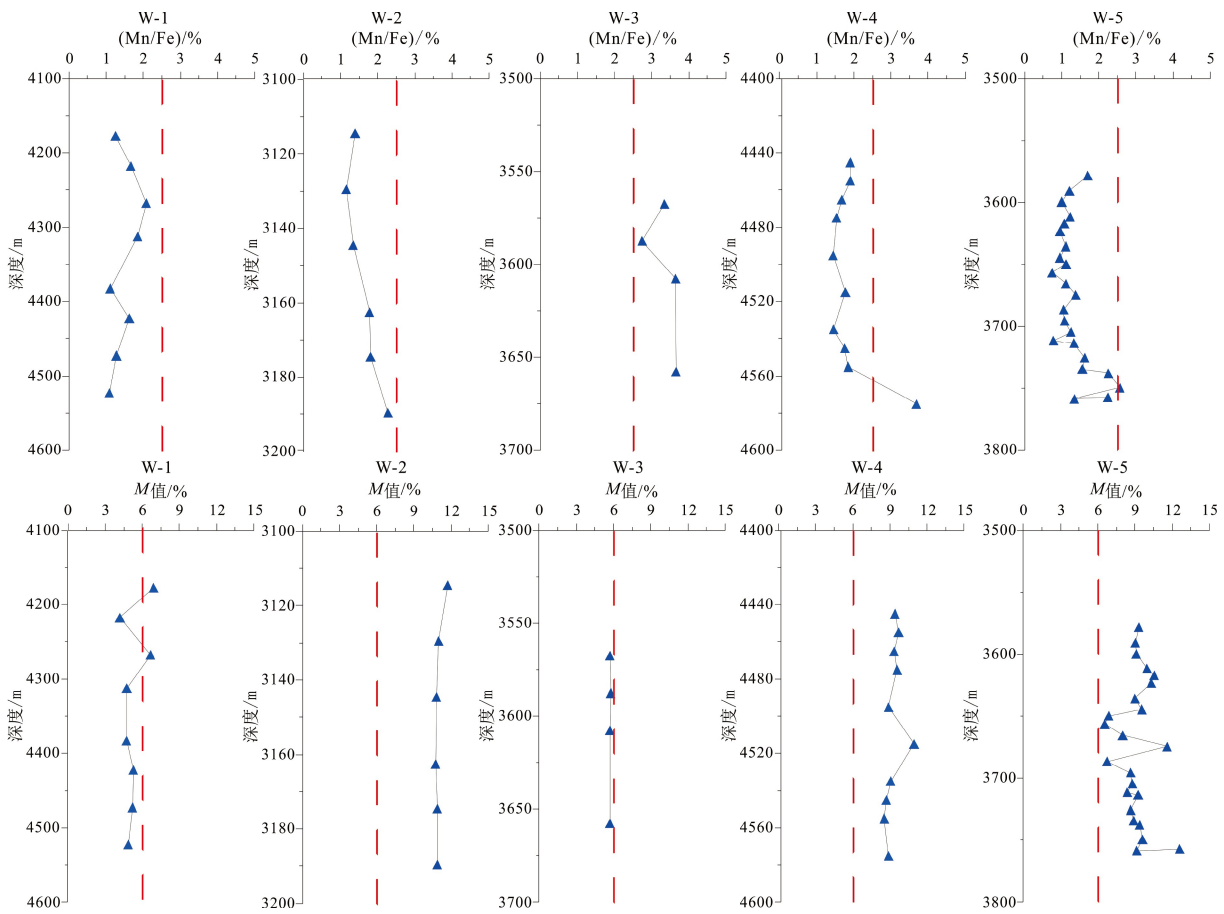


图2 钻井古水深地球化学参数纵向变化

Fig.2 Vertical variation of geochemical parameters of paleo water depth in drilling wells

<0.60 为氧化环境; Th/U 比值在氧化环境下达到 8, 还原环境下普遍为 $0\sim 2$ ^[14-16]。

W-1 井 $V/(V+Ni)$ 为 $0.46\sim 0.69$, 均值为 0.60 , 且自下而上呈减小趋势, 指示恩平期由亚还原环境向氧化环境转变; W-2 井 $V/(V+Ni)$ 为 $0.67\sim 0.72$, 均值为 0.70 , 且纵向上较稳定, 指示亚还原环境; W-3 井 $V/(V+Ni)$ 为 $0.81\sim 0.90$, 均值为 0.83 , 指示亚还原—还原环境, 古氧相由还原环境逐渐过渡为亚还原环境。受凹陷东南方向海侵影响, W-5 井 $V/(V+Ni)$ 纵向上波动较大, 由于海侵作用相对有限, W-4 井受影响相对较小, W-4 井 $V/(V+Ni)$ 为 $0.60\sim 0.84$, 均值为 0.79 , W-5 井 $V/(V+Ni)$ 为 $0.53\sim 0.81$, 均值为 0.73 , 均指示亚还原环境(表 1, 图 3)。

对比各钻井 Th/U 和 $V/(V+Ni)$ 分析结果, 研究区单井 Th/U 总体为 $4\sim 8$, 表明白云凹陷恩平期总体处于亚还原环境, 各洼陷恩平期还原性由强到弱依次为白云主洼、白云南洼、白云东洼和白云西洼(图 4), 其中, 白云南洼受东南部海侵影响, 古氧相参数数值跨度较大, 白云西洼远离东南部海水入口, 但受河流输入影响^[13], 破坏了水体稳定性, 恩平

期沉积环境还原性较弱。

3.2.3 古气候

沉积物中元素信息完整地记录了沉积期内古气候的变化, 在干燥气候条件下, 由于地表水分大量蒸发, 导致沉积物中 Sr 和 Mg 大量析出沉积在水底, 而陆相沉积物中 Cu 难以迁移入湖, 导致湖泊沉积物中 Sr 和 Mg 富集, Cu 匮乏, 运用 MgO 含量和 Sr/Cu 比值可较好地反映古气候变化, 在干燥气候条件下, MgO 含量和 Sr/Cu 比值较高^[16-17]。

W-1 井 Sr/Cu 为 $1.30\sim 3.54$, 均值为 2.46 , 纵向上较稳定; W-2 井 Sr/Cu 为 $7.51\sim 11.07$, 均值为 9.03 , 且自下而上有增大趋势, 表明气候逐渐变湿热; W-3 井 Sr/Cu 为 $4.14\sim 11.38$, 均值为 6.23 , 且深层 Sr/Cu 明显大于浅层, 表明气候由湿热向暖湿转变; W-4 井和 W-5 井 Sr/Cu 均值约为 5.25 , 其中, W-5 井恩平晚期 Sr/Cu 增大明显, 表明晚期气候相对湿热(表 1, 图 5)。

通过 MgO 和 Sr/Cu 可明显区分白云凹陷各洼陷恩平期气候特征(图 6), W-1 井 MgO 和 Sr/Cu 均较低, 表明白云西洼气候偏冷潮湿; W-3 井、W-4 井

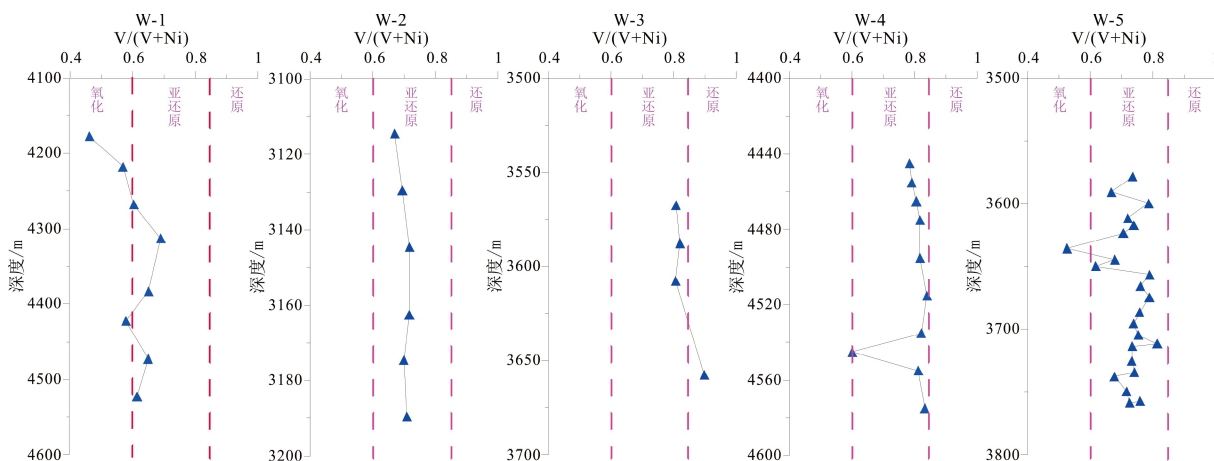
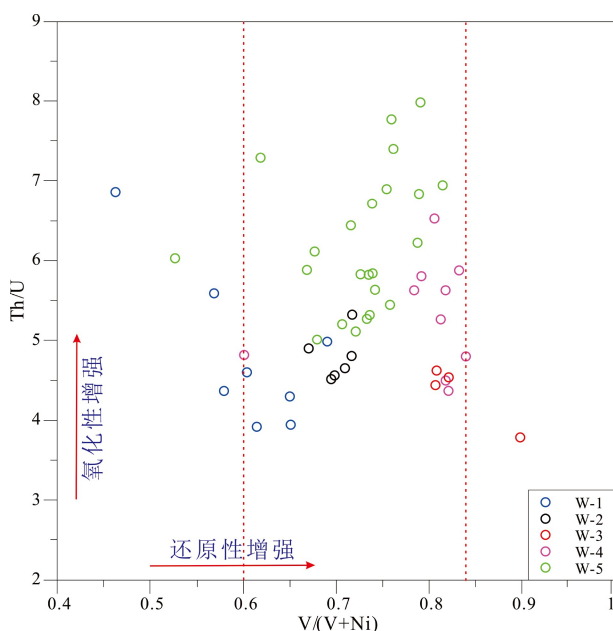


图 3 钻井古氧相地球化学参数纵向变化

Fig.3 Vertical variation of geochemical parameters of paleo-oxygenation facies in drilling wells

图 4 $V/(V+Ni)$ 与 Th/U 比值关系特征Fig.4 Relationship between $V/(V+Ni)$ and Th/U indicating the variation of paleo-oxygenation facies

和 W-5 井 MgO 及 Sr/Cu 值显示白云主洼、白云南洼恩平期气候总体为暖湿气候; W-2 井 MgO 和 Sr/Cu 均较高, 表明白云东洼气候湿热。

3.2.4 古盐度

古盐度是古环境分析中的一个重要指标, 是反映地质历史时期海陆变迁的重要参数。元素 Li 和 Ni 是咸化湖盆的重要保留元素, 可在湖盆中长时间保存^[18]。一般认为 $Li > 150 \mu g/g$, $Ni > 40 \mu g/g$ 代表咸水环境, $90 \mu g/g < Li < 150 \mu g/g$, $25 \mu g/g < Ni < 40 \mu g/g$, 为半咸水环境, $Li < 90 \mu g/g$, $Ni < 25 \mu g/g$, 为淡水环境^[19]。

W-1 井恩平组 Ni 最大值为 $5.06 \mu g/g$, 纵向上分布稳定, 指示淡水环境; W-2 井恩平组 Ni 分布于

$30.70 \sim 35.5 \mu g/g$, 且自下而上无明显变化, 指示半咸水环境; W-3 井恩平组 Ni 最大值为 $19.70 \mu g/g$, 且自下而上 Ni 含量增加, 水体有咸化趋势, 但总体指示淡水环境; W-4 井恩平期总体处于淡水环境, 且自下而上 Ni 含量增加, 指示水体盐度升高, 底部受海侵影响, 造成局部 Ni 偏高; W-5 井恩平期受海侵影响显著, 纵向上 Ni 含量波动明显, 总体处于半咸水环境(表 1, 图 7)。

采集 5 口钻井恩平组泥岩样品 Li 元素和 Ni 元素分布特征进行恩平期水体古盐度对比分析, 结果表明, W-1 井、W-3 井全部样品点和 W-4 井大部分样品点都位于淡水区; W-2 井全部样品点和 W-5 井大部分样品点位于半咸水区; W-4 井和 W-5 井部分样品点位于咸水区(图 8)。判别图版分析结果与区域地质背景吻合, 白云西洼靠近河流入海口, 受河流淡水输入影响, 古盐度低; 白云东洼被隆起围限, 处于相对封闭的环境, 且气候较干燥, 地表水体蒸发快, 水体盐度相对较高; 白云南洼恩平期受东南部海侵影响, 水体盐度高, 且越靠近东南部海水入口水体盐度越高。

3.2.5 埋藏效率

埋藏效率的大小与有机碳埋藏量密切相关, 埋藏效率越高, 有机质保存条件越好, 有机碳埋藏量越多^[20]。研究表明生物成因钼与沉积物有机碳的堆积速率相关性良好, 能够较好地表征有机碳埋藏量的变化。生物成因钼可由沉积物中实测钼和钛含量经陆源校正后获得^[21], 公式如下:

$$Mo_{xs} = Mo_{\text{样品}} - (Mo/Ti)_{PAAS} \times Ti_{\text{样品}} \quad (1)$$

式中: Mo_{xs} 为生物成因钼, 单位 $\mu g/g$; $Mo_{\text{样品}}$ 为样品实测钼含量, 单位 $\mu g/g$; $(Mo/Ti)_{PAAS}$ 为太古代晚期澳大利亚页岩中 Mo 和 Ti 平均含量的比值, 其中,

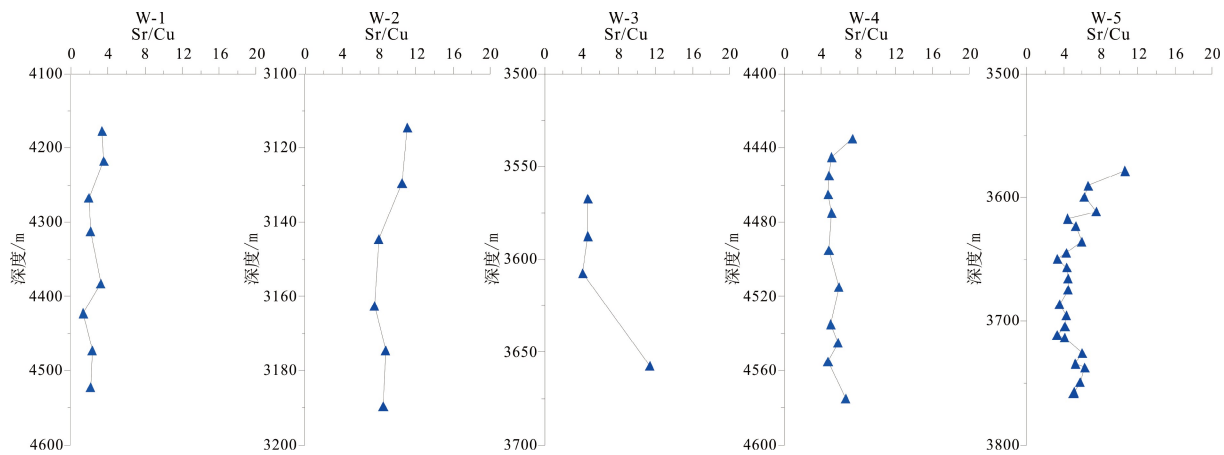


图 5 钻井古气候地球化学参数纵向变化

Fig.5 Vertical variation of geochemical parameters of paleoclimate in drilling wells

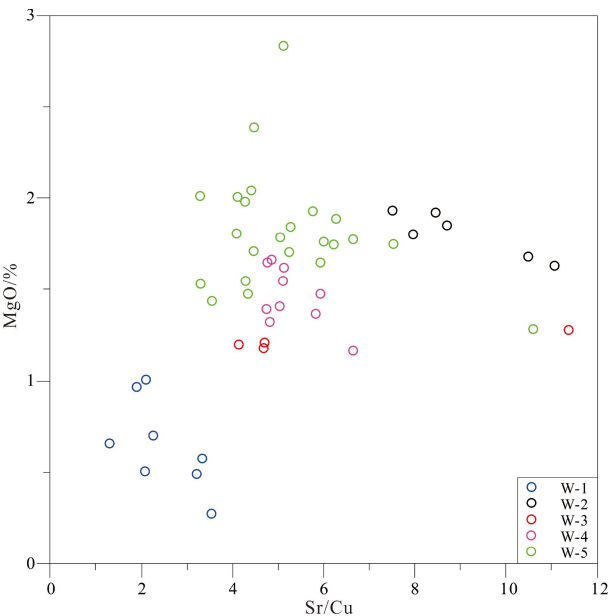


图 6 MgO 与 Sr/Cu 关系特征

Fig.6 Relationship between MgO and Sr/Cu indicating the variation of paleoclimate

Mo 和 Ti 的 PAAS 值分别为 1 和 10 000 $\mu\text{g/g}$; Ti 样品为样品实测钛含量。

公式 (1) 计算得到白云凹陷各井恩平期 Moxs 含量 (表 1), Moxs 含量均值由高到低依次为 W-5 井、W-2 井、W-4 井、W-3 井和 W-1 井。结果表明白云东洼由于受隆起围限, 保存条件好, 埋藏效率高; 白云南洼恩平期受东南部海侵影响, 埋藏效率波动, 但总体偏好; 白云主洼恩平期埋藏效率相对中等; 白云西洼恩平期埋藏效率相对最低。

3.3 古环境演化的石油地质意义

烃源岩的形成受古水深、古氧相、古气候和古盐度等古环境因素的影响。水深的增加造成洼陷可容纳空间的增大, 砂体搬运距离减小, 泥岩含量增高, 具备形成优质烃源岩的有利条件^[8]; 烃源岩发育环境的氧化还原条件直接影响烃源岩品质, 还原环境有利于烃源岩有机质的保存, 表现为烃源岩有

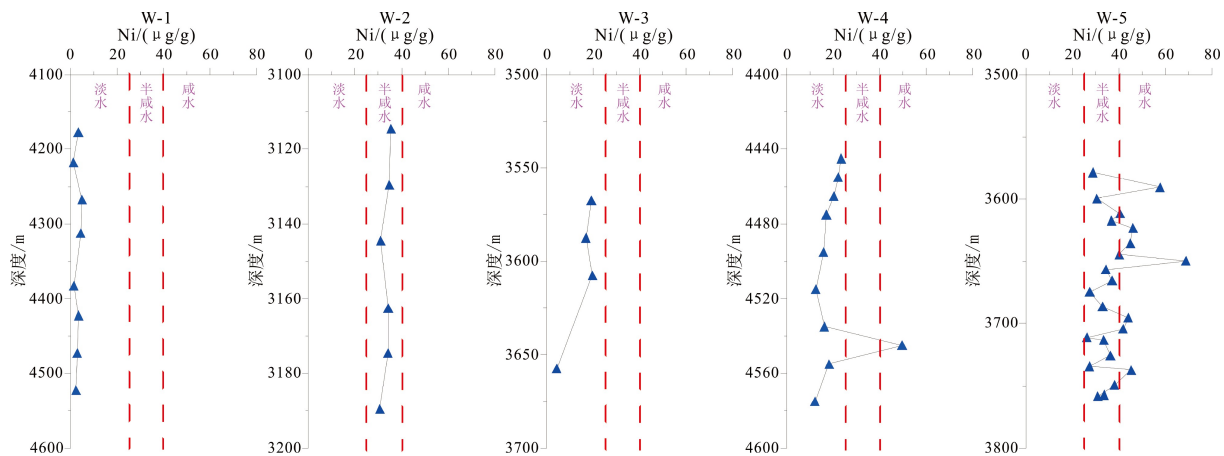


图 7 钻井古盐度地球化学参数纵向变化

Fig.7 Vertical variation of geochemical parameters of paleosalinity in drilling wells

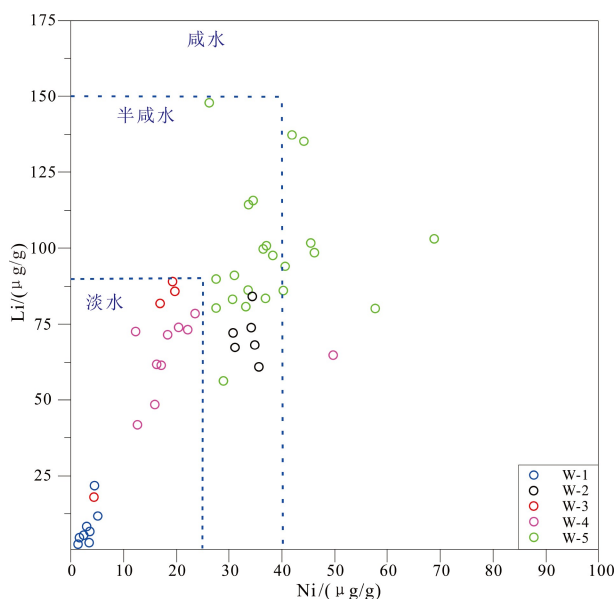


图8 Li与Ni关系特征

Fig.8 Relationship between Li and Ni indicating the paleosalinity

机质丰度高;湿热气候有利于湖盆中藻类发育和陆上植物生长,为优质烃源岩发育提供充足的物质基础,同时,在湿热的气候条件下,大量的陆上植被能较好保持水土,减少无机屑对烃源岩有机质的稀释,利于有机质保存^[22];咸化水体易发生水体分层现象,浅层水体盐度低,可发育种类丰富的水生生物,深层水体盐度高,水生生物较少,分解有机质的细菌含量相对较低,脂类化合物等生油组分得以保存,产甲烷菌受到抑制而不发育,易于形成有机质丰度高、类型好的烃源岩^[23-24]。

元素地球化学特征分析结果表明,白云主洼恩平期水深较深,可容纳空间较大,具备形成规模烃源岩的有利场所,其他次洼水深相对较浅,烃源岩规模相对较小;白云东洼恩平期气候湿热,白云主洼和南洼恩平期气候暖湿,有利的气候条件易于藻类和陆上植物发育,为优质烃源岩的形成提供物质保障,白云西洼恩平期受河流淡水输入的影响,气候偏冷潮湿,藻类和陆上植被发育受限;白云东洼和南洼恩平期水体盐度相对较高,咸水层有机质分解慢,有利于类脂物的保存与生烃转化,同时,白云南洼恩平期在海侵作用下带来大量海洋浮游生物,为优质烃源岩的形成提供物质基础^[25-26],白云主洼和西洼恩平期总体处于淡水环境,白云西洼恩平期受河流淡水输入的影响,水体盐度更低。古氧相和埋藏效率的分析结果显示,白云东洼恩平期湖盆较封闭,受外界影响较小,总体处于亚还原环境,埋藏效率高,有利于有机质的保存;白云主洼恩平期水深较大,利于还原条件的保持,埋藏效率中等,白云

南洼恩平期受海侵影响,古氧相和埋藏效率参数波动变化,总体偏好;白云西洼由于河水输入破坏了水体稳定性,沉积环境还原性较弱,埋藏效率较低,有机质保存条件相对较差。

4 结论

(1)白云主洼恩平期水深相对最深,处于亚还原—还原的淡水环境,暖湿气候,埋藏效率相对中等,有利于大规模较有利烃源岩的形成和保存。

(2)白云东洼和白云南洼恩平期水深较浅,总体处于亚还原的半咸水环境,气候温暖潮湿,埋藏效率高,为优质烃源岩的形成和保存创造了条件,烃源岩总体规模小于白云主洼。

(3)白云西洼恩平期水深略大于东洼和南洼,处于弱还原淡水环境,气候偏冷潮湿,埋藏效率相对最低,烃源岩形成和保存条件相对较差。

参考文献 (References)

- [1] 宋春晖, 鲁新川, 邢强, 等. 临夏盆地晚新生代沉积物元素特征与古气候变迁[J]. 沉积学报, 2007, 25(3): 409-416. [SONG Chunhui, LU Xinchuan, XING Qiang, et al. Late Cenozoic element characters and palaeoclimatic change of the lacustrine sediments in Linxia Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3): 409-416.]
- [2] 程岳宏, 于兴河, 韩宝清, 等. 东濮凹陷北部古近系沙三段地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 357-366. [CHENG Yuehong, YU Xinghe, HAN Baoqing, et al. Geochemical characteristics of the 3rd Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Depression and their geological implications [J]. *Geology in China*, 2010, 37(2): 357-366.]
- [3] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水油气成藏与勘探[J]. 科学通报, 2012, 57(24): 3121-3129. [ZHU Weilin, ZHONG Kai, LI Youchuan, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea deepwater basins [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24): 3121-3129.]
- [4] 米立军, 何敏, 翟普强, 等. 珠江口盆地深水区白云凹陷高热流背景油气类型与成藏时期综合分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(1): 1-12. [MI Lijun, HE Min, ZHAI Puqiang, et al. Integrated study on hydrocarbon types and accumulation periods of Baiyun sag, deep water area of Pearl River Mouth basin under the high heat flow background [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(1): 1-12.]
- [5] 米立军, 张忠涛, 庞雄, 等. 南海北部陆缘白云凹陷油气富集规律及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 902-913. [MI Lijun, ZHANG Zhongtao, PANG Xiong, et al. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation in Baiyun Sag at northern continental margin of South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 902-913.]
- [6] 李成海, 王家豪, 柳保军, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系沉积相类

- 型[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1162-1170. [LI Chenghai, WANG Jiahao, LIU Baojun, et al. Types and distribution of the paleogene sedimentary facies in Baiyun depression of Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1162-1170.]
- [7] 朱俊章, 施和生, 庞雄, 等. 白云深水区东部油气成因来源与成藏特征[J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(4): 20-28. [ZHU Junzhang, SHI Hesheng, PANG Xiong, et al. Origins and accumulation characteristics of hydrocarbons in eastern Baiyun Deepwater area [J]. *China Petroleum Exploration*, 2012, 17(4): 20-28.]
- [8] 陈斌, 李勇, 邓涛, 等. 晚三叠世龙门山前陆盆地须家河组泥页岩沉积环境及有机质富集模式[J]. *地质科学*, 2019, 54(2): 434-451. [CHEN Bin, LI Yong, DENG Tao, et al. The sedimentary environment and organic matter enrichment pattern of Xujiache Formation shale in the Late Triassic Longmenshan foreland basin, SW China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2019, 54(2): 434-451.]
- [9] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications [J]. *Precambrian Research*, 1995, 73(1-4): 27-49.
- [10] 陈波, 薛雨见君, 赵云南, 等. 柴北缘平台地区下干柴沟组下段元素地球化学特征及意义[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(1): 12-17. [CHEN Bo, XUE Yujianjun, ZHAO Yunnan, et al. Geochemical characteristic and significance of elements in lower member of Lower Ganchaigou formation in the platform area on North Margin of Qaidam Basin [J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2019, 26(1): 12-17.]
- [11] 陈强, 张慧元, 李文厚, 等. 鄂尔多斯奥陶系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其意义[J]. *古地理学报*, 2012, 24(1): 117-124. [CHEN Qiang, ZHANG Huiyuan, LI Wenhui, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of the Ordovician carbonate rocks in Ordos and their implication [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 24(1): 117-124.]
- [12] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 甘肃: 甘肃科学技术出版社, 1993: 1-31. [DENG Hongwen, QIAN Kai. *Sedimentary Geochemistry and Environment Analysis*[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 1-31.]
- [13] 曾智伟, 朱红涛, 杨香华, 等. 珠江口盆地白云凹陷恩平组物源转换及沉积充填演化[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1936-1954. [ZENG Zhiwei, ZHU Hongtao, YANG Xianghua, et al. Provenance transformation and sedimentary evolution of Enping formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1936-1954.]
- [14] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 缺氧环境及地球化学判识标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 365-372. [TENGGER, LIU Wenhui, XU Yongchang, et al. The discussion on anoxic environments and its geochemical identifying indices [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 365-372.]
- [15] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [16] Jones B, Manning D A C. Comparison of Geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1-4): 111-129.
- [17] 王峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(6): 1265-1273. [WANG Feng, LIU Xuanchun, DENG Xiuqin, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang formation in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6): 1265-1273.]
- [18] Owen L A, Finkel R C, Barnard P L, et al. Climatic and topographic controls on the style and timing of Late Quaternary glaciation throughout Tibet and the Himalaya defined by ^{10}Be cosmogenic radionuclide surface exposure dating [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(12-13): 1391-1411.
- [19] 田景春, 张翔. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 63-77. [TIAN Jingchun, ZHANG Xiang. *Sedimentary Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 63-77.]
- [20] 曹婷婷, 徐思煌, 王约, 等. 四川盆地南江杨坝地区下寒武统烃源岩形成的地球生物学条件[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(1): 11-16. [CAO Tingting, XU Sihuang, WANG Yue, et al. Geobiological conditions for the formation of the Lower Cambrian source rocks in Yangba area of Nanjiang County in the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 11-16.]
- [21] Siebert C, McManus J, Bice A, et al. Molybdenum isotope signatures in continental margin marine sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(3-4): 723-733.
- [22] 刘占红, 李思田, 辛仁臣, 等. 地层记录中的古气候信息及其与烃源岩发育的相关性——以渤海黄河口凹陷古近系为例[J]. *地质通报*, 2007, 26(7): 830-840. [LIU Zhanhong, LI Sitian, XIN Renchen, et al. Paleoclimatic information in stratigraphic records and its relation to the formation of hydrocarbon source rocks—A case study of the Paleogene strata in the Huanghekou subbasin of the Bohai Bay basin, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(7): 830-840.]
- [23] 夏刘文, 曹剑, 徐田武, 等. 盐湖生物发育特征及其烃源意义[J]. *地质论评*, 2017, 63(6): 1549-1562. [XIA Liuwen, CAO Jian, XU Tianwu, et al. Development characteristics of Biologies in saline lake environments and their implications for hydrocarbon source [J]. *Geological Review*, 2017, 63(6): 1549-1562.]
- [24] 张斌, 何媛媛, 陈琰, 等. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩形成机理[J]. *石油学报*, 2018, 39(6): 674-685. [ZHANG Bin, HE Yuanyuan, CHEN Yan, et al. Formation mechanism of excellent saline lacustrine source rocks in western Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(6): 674-685.]
- [25] 殷杰, 王权, 郝芳, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚段古湖泊环境与烃源岩发育模式[J]. *地球科学*, 2017, 42(7): 1209-1222. [YIN Jie, WANG Quan, HAO Fang, et al. Palaeolake environment and depositional model of source rocks of the lower submember of Sha1 in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science*, 2017, 42(7): 1209-1222.]
- [26] 陈笑夜, 曹剑, 施春华, 等. 陆相湖盆海侵地质事件识别及其对烃源岩形成影响[J]. *地质评论*, 2012, 58(5): 901-910. [CHEN Xiaoye, CAO Jian, SHI Chunhua, et al. A review on the distinguishing of marine transgression in continental basins and its impacts on the formation of hydrocarbon source rocks [J]. *Geological Review*, 2012, 58(5): 901-910.]