

盆地长 9₁ 湖相优质烃源岩的发育机制探讨

张文正* 杨 华 傅锁堂 昝川莉

(中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司勘探开发研究院,
中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司, 西安 710021)

摘要 新近的钻探和有机地球化学测试与研究, 在鄂尔多斯盆地上三叠统长 9 油层组上段发现了一套湖相优质烃源岩, 其平均 TOC 达 5.03%, 平均沥青“A”含量达 0.8603%, 有机母质类型——以低等水生生物为主要来源的腐泥型, 并已达到了生油高峰的热演化阶段. 湖相优质烃源岩发育于湖盆的局部凹陷. 各项有机、无机地球化学参数反映出长 9₁ 优质烃源岩形成于淡水—微咸水、弱氧化—弱还原的半深湖相沉积环境. 因此, 高生产力是该套优质烃源岩形成的主控因素. 薄层凝灰岩、纹层状凝灰岩的沉积, 以及 Eu 显著正异常的发现, 佐证了同期可能存在与火山喷发有关的缺氧地质事件. 地质事件对长 9₁ 优质烃源岩的发育起着重要的作用.

关键词 鄂尔多斯盆地 陆相湖盆 优质烃源岩 高生产力 地质事件

自延深 1 井钻成至今, 鄂尔多斯盆地中生界石油勘探已有百年历史. 近些年, 随着石油勘探力度的不断加大、地质认识的深化和低渗透、特低渗透油田开发技术的不断提高, 鄂尔多斯盆地的石油储量和产量呈现出快速增长之势.

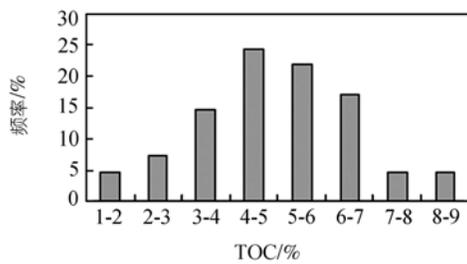
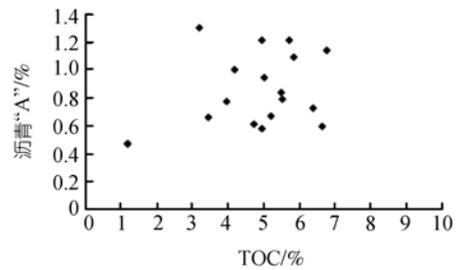
鄂尔多斯盆地上三叠统延长组自下往上可划分为长 10~长 1 共 10 个油层组. 长 7 油层组是晚三叠世湖盆最大湖泛期的沉积地层, 长 9 油层组属晚三叠世湖盆早期发展阶段的沉积地层. 以往的烃源岩地球化学研究认为长 8~长 4+5 油层组中的暗色泥岩是中生界的主要烃源岩. 由于客观条件所限, 对长 9 油层组的烃源岩研究较少. 随着石油勘探的不断深入, 近期在长 9 油层组上段首次揭示了具有优质烃源岩属性的黑色泥页岩烃源层. 鉴于优质烃源岩在油气聚集中所起的重要作用, 国内外学者已十分重视优质烃源岩的发育机制与分布规律研究^[1~6]. 因此, 对新

发现的长 9₁ 优质烃源层进行地球化学特征、发育环境及其控制因素的研究, 将有助于认识其分布规律, 并进一步评价其在石油成藏中的作用, 为石油勘探提供科学依据. 同时, 也可加深对晚三叠世湖盆演化的认识.

1 长 9₁ 湖相优质烃源岩的有机地球化学特征

1.1 有机质丰度

对长 9₁ 黑色泥、页岩发育区的 2 口全取芯井和 1 口部分取芯井的岩芯进行了系统采样和有机地球化学分析测试. 分析结果的统计显示, 长 9₁ 黑色泥、页岩的总有机碳含量(TOC)分布于 1.19%~8.64%之间, 主频为 3%~7%(图 1), 41 个样品的平均 TOC 为 5.03%; 沥青“A”含量分布于 0.4724%~1.2997%(图 2), 17 个样品的平均沥青“A”含量为 0.8603%; 岩石热解分析 S₁ 分布于(1.4~8.54) mg/g, 41 个样品的 S₁ 平均值为 4.18

图 1 长 9₁ 黑色泥、页岩 TOC 频率分布图图 2 长 9₁ 黑色泥、页岩 TOC-沥青“A”交汇图

mg/g; 热解生烃潜量(S_1+S_2)分布于(4.12~27.03) mg/g, 平均生烃潜量为 15.94 mg/g. 上述各项地球化学参数均表明长 9₁ 黑色泥、页岩的有机质丰度高, 生烃潜量较高, 具有优质烃源岩的属性^[4].

纵向上, 烃源层的地球化学参数存在一定的变化(图 3), 可能是受到了沉积环境变化的影响.

1.2 有机质性质

干酪根镜下观察与鉴定结果显示, 长 9₁ 优质烃源岩的生物来源以藻类无定型占绝对优势, 含量大于 92%. 干酪根富 ^{12}C ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分布于 -29.16‰ ~ -29.59‰)的特征也反映出其生物来源相对单一、以湖生藻类为主的特点, 有机质类型为腐泥型.

长 9₁ 优质烃源岩的可溶有机质也具有腐泥型干酪根热解产物的特征: 族组成的高烃类组分含量

65.83%~86.32%、高饱/芳比值(3.37~6.32); 正构烷烃分子系列贫 ^{13}C , 并呈平稳型分布(图 4)^[2]; 萘烷类化合物具有三环萘类化合物含量较高、 $18\alpha(\text{H})$ -三降藿烷(Ts)和 $17\alpha(\text{H})\text{-C}_{30}$ 重排藿烷相对含量高的显著特征, 可能与较高的细菌有机质输入有关; 甾烷分布具较高的重排甾烷、较为丰富的孕甾烷等特征, $\alpha\alpha\alpha(20\text{R})$ 甾烷的呈“V”字型分布(图 5), 也反映出其生源构成以湖生低等生物为主.

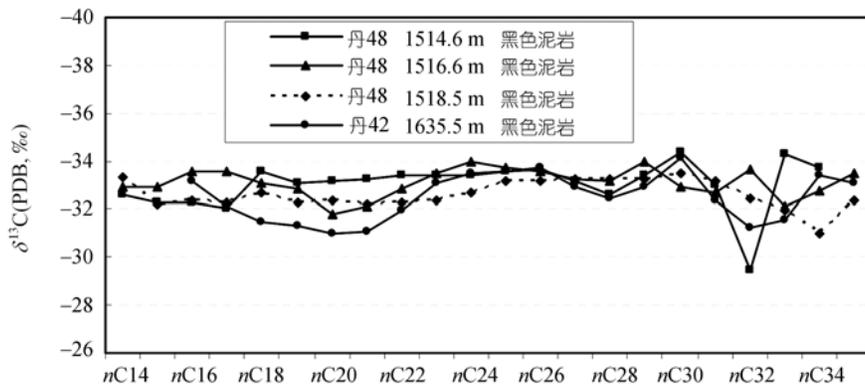
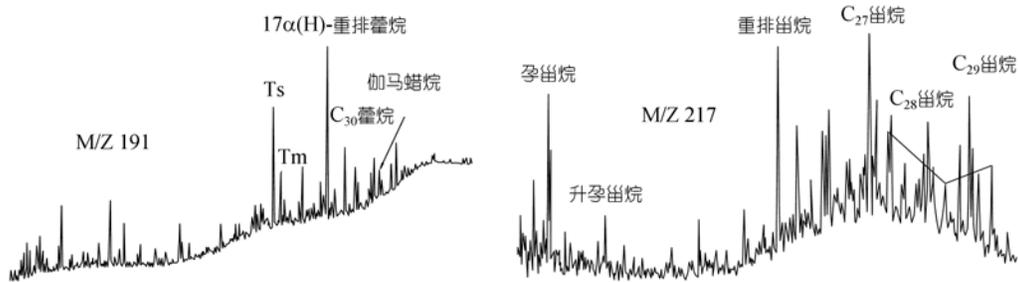
1.3 成熟度

长 9₁ 优质烃源岩发育区岩样干酪根的实测镜质体反射率(R_o)为 0.92%~1.05%, 岩石热解 T_{max} 主要分布于 448~458°C, 沥青“A”转化率高(图 3); 饱和烃色谱参数-OEP为 1.03~1.06, Pr/Ph 为 0.15~0.17, Pr/Ph 为 0.10, 主峰碳为 $n\text{C}_{17}\sim n\text{C}_{19}$, 甾萘烷成熟度参数——



a) $1\text{API}=39.37\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$

图 3 丹 49 井长 9₁ 烃源岩测井——有机地球化学剖面图

图 4 长 9₁ 优质烃源岩正构烷烃单体碳同位素分布模式图 5 长 9₁ 优质烃源岩甾、萜烷生物标志化合物分布特征

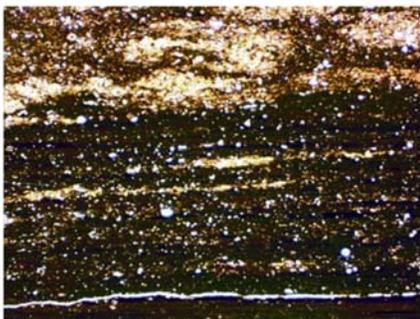
$\alpha\alpha$ -C₂₉ 甾烷 20S/20(R+S)为 0.505~0.514, C₃₁ 藿烷 22S/(22S+22R)为 0.48~0.53, 重排甾烷较丰富, 以上各项地球化学参数均一致反映出长 9₁ 优质烃源岩已达到生油高峰演化阶段。

2 长 9₁ 优质烃源岩的发育环境

长 9₁ 优质烃源岩的连续厚度约为 5~18m. 中间夹有一薄层(厚度约 1~2 m)的粉砂岩-泥质粉砂岩, 另外, 烃源层中还可以见到薄层凝灰岩(厚度约为 10 cm)和纹层状凝灰岩(图 6). 长 9₁ 优质烃源岩外观呈黑

色、灰黑色, 陆源碎屑含量较高, 以石英为主, 磨圆度较好(图 7), 页理较发育, 反映水体较为平静。

平面上, 长 9₁ 优质烃源岩主要发育于陕北志丹地区南部, 分布范围较为局限. 盆地其它大部分地区的长 9₁ 地层以浅水沉积的砂泥组合为特征, 不具备水生生物大量繁殖和有机质保存的基本条件. 泥质岩以灰色砂质泥岩和含砂泥岩为主, 偶见暗色泥岩, 常见高等植物化石和碳屑. 因此, 从盆地总的沉积背景来看, 长 9₁ 优质烃源岩应发育于水体相对较深的局部凹陷中, 应属半深湖相沉积。

图 6 长 9₁ 烃源岩中的凝灰岩纹层(×25)图 7 长 9₁ 烃源岩的薄片照片(×100)

沉积岩(烃源岩)中的微量元素、稀土元素地球化学参数和生物标志化合物参数是重建古环境的重要依据. 通常, 变价元素——过渡金属元素由于在氧化、还原环境下的价态不同, 因而在不同的氧化还原条件下会表现出易沉淀或易迁移的地球化学习性, 因此可以通过沉积物中某些元素的亏损或富集、以及相关参数进行古环境分析^[8-10].

长 9₁ 优质烃源岩的常量元素采用X-射线荧光光谱法测试, 微量、稀土元素采用等离子质谱法(岛津 ICPS-7500), 由核工业 203 研究所分析测试中心测试. 测试结果显示, 长 9₁ 优质烃源岩中 Cr, Co, Mo 等微量元素与页岩的克拉克值^[11]相近, Cu, Zn, U, Ga, Sr, Nb 等微量元素略显富集, Ba, Sc, Th, Y, U 等微量元素富集, V, Ni, Zr, Li, Mn 等微量元素则表现为一定程度的亏损(图 8). Cu, Zn 是亲硫、亲生物元素, 其相对富集可能与烃源岩相对富集 S²⁻(0.89%~2.97%)和高有机质有关. V 也是亲生物元素, 在氧化环境下呈高价易迁移, 在还原条件下易沉淀, 因此 V 的相对亏损可能反映了水体的相对富氧和较低的含盐度的特征. Ba, Cu 等微量元素的富集可能与火山喷发活动有关, 是否

存在弱的热水活动有待进一步研究.

长 9₁ 优质烃源岩的稀土元素含量(Σ REE)较高, 分布于 225.39~325 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 说明陆源碎屑补给较为充足. 北美页岩标准化后, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分布于 1.18~1.87, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 1.24~1.97, LREE/HREE 为 1.10~1.43, 稀土元素配分型式呈轻稀土相对富集型(图 9). 与最大湖泛期沉积的长 7₃ 富有机质优质烃源岩相比(表 1), 长 9₁ 优质烃源岩的总稀土含量和轻稀土富集程度均较高, 可能反映了长 7₃ 与长 9₁ 在沉积环境上存在较为明显的差异.

反映氧化-还原环境的各项参数为: $V/(V+\text{Ni})$ 为 0.73~0.77, U/Th 为 0.23~0.35, V/Cr 为 1.16~1.31, V/Sc 为 5.45~7.38, 明显低于长 7 油页岩(表 1), 总体上反映出长 9₁ 优质烃源岩的沉积环境为弱氧化—弱还原^[8,9]. δEu 值变化大, 烃源层自下而上(6 号样品-1 号样品)呈 Eu 负异常-Eu 显著正异常-Eu 弱负异常-Eu 弱正异常的变化, δEu 值的明显变化可能反映了沉积环境频繁变化的特征. 4 号样品 Eu 的显著正异常, 以及该样品磷的正异常(P_2O_5 含量为 1.08%)、Mn, Sr 的正异常可能与缺氧的地质事件有关^[10].

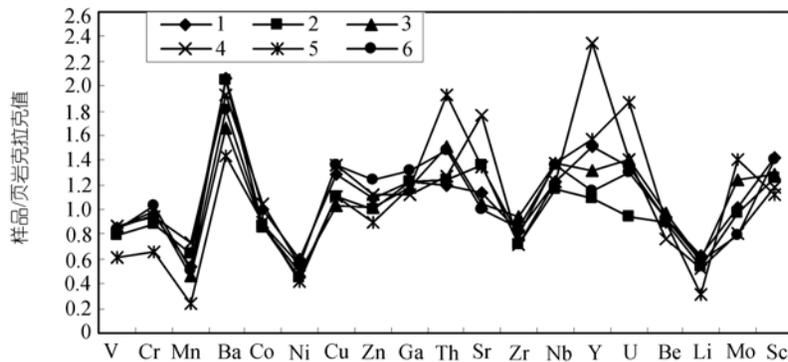


图 8 长 9₁ 优质烃源岩的微量元素配分型式(样品信息见表 1)

表 1 长 9₁ 优质烃源岩和凝灰岩的微量元素、稀土元素地球化学参数

样品编号	层位	井深/m	岩性	Sr/Ba	V/(V+Ni)	U/Th	V/Cr	V/Sc	Σ REE/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	北美页岩标准化				
										δEu	δCe	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Lu})_N$	LREE/HREE
1	长 9	1669.35	黑色泥岩	0.29	0.73	0.35	1.27	6.06	286.58	1.04	0.97	1.87	1.97	1.39
2	长 9	1670.91	黑色泥岩	0.35	0.77	0.23	1.28	6.28	225.7	1	0.98	1.85	1.79	1.43
3	长 9	1673.54	黑色泥岩	0.33	0.77	0.29	1.25	6.67	250.1	0.89	1.01	1.58	1.53	1.3
4	长 9	1676.15	黑色泥岩	0.47	0.75	0.34	1.32	7.38	325.62	1.96	0.95	1.67	1.76	1.42
5	长 9	1679.06	黑色泥岩	0.48	0.73	0.30	1.31	5.45	238.82	0.76	1.05	1.18	1.24	1.1
6	长 9	1682	黑色泥岩	0.29	0.74	0.27	1.16	5.93	225.39	0.83	0.96	1.64	1.53	1.27
平均值	长 9		黑色泥岩	0.37	0.75	0.30	1.27	6.30	258.7	1.08	0.99	1.63	1.64	1.32
平均值	长 7		油页岩	0.35	0.85	3.74	4.94	17.49	188.28	0.9	0.89	1.47	1.46	1.18
7	长 9		凝灰岩						140.39	0.37	0.97	1.22	1.27	1.01

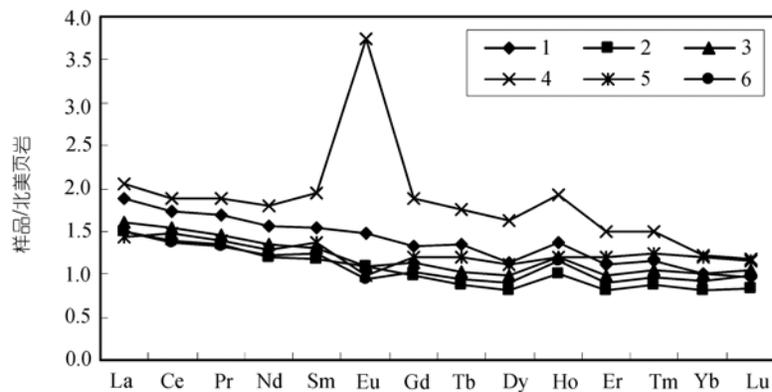


图 9 长 9₁ 优质烃源岩的稀土元素配分型式(样品信息见表 1)

饱和烃色谱-质谱分析(图 5, 中国石油勘探开发研究院石油地质研究中心测试)显示, 丹 48 井长 9₁ 优质烃源层中不同位置的 3 个样品, 其萜烷类化合物分布均显示出异常高的 17 α (H)-C₃₀ 重排藿烷的显著特征. 烃源岩中高含量的 17 α (H)-C₃₀ 重排藿烷可能与细菌藿类先质有关, 是 D 环上带有功能团的藿类经重排作用形成^[12]. 这种重排藿烷明显起源于氧化至弱氧化环境的细菌有机质, 因为细菌藿类先质是在 D 环经历了氧化作用, 并只有在酸性介质环境和黏土矿物催化作用下才易于发生重排而形成 17 α (H)-C₃₀ 重排藿烷^[13]. 因此, 高含量的 17 α (H)-C₃₀ 重排藿烷可指示弱氧化和酸性介质环境. 这与甾烷类化合物中较高的重排甾烷所反映的沉积环境相吻合.

长 9₁ 烃源岩的姥植均势(Pr/Ph 为 1.02~1.55), 低伽马蜡烷含量, 低 Sr/Ba 比值(0.29~0.48)、低 B 含量(6.45×10^{-6} ~ 15.6×10^{-6})、较低的 CaO(1.24%~2.10%)、MgO(1.82%~2.20%)含量等特征也反映出其沉积水体含盐度较低、未出现分层的特点, 属淡水-微咸水沉积环境.

综上所述, 长 9₁ 优质烃源岩的发育环境应是淡水-微咸水、半深湖相、弱氧化-弱还原环境, 即水体相对富氧、沉积物表层相对贫氧的环境.

3 长 9₁ 优质烃源岩的高生产力模式

从区域地质来看, 晚三叠世时, 华北陆块已与扬子陆块碰撞、拼合, 封闭了残存的右江、秦岭海槽, 导致了秦岭的崛起^[14]. 在此区域地球动力背景下, 鄂尔多斯地区经历了湖盆的形成、发展及消亡的演化过程. 区域构造活动引起的湖泛-水体扩张提供了湖相优质烃源岩的发育的基本条件.

通常, 较高-高的初级生产力和缺氧环境(水体底层或沉积物表层)是形成富有机质优质烃源岩的必要条件^[15-18]. 沉积速率也会影响到有机质的富集程度, 过补偿沉积对有机质的“稀释作用”会降低有机质富集程度. 由于长 9 期的湖泛规模较小、湖盆水体较浅, 仅在局部凹陷水体相对较深, 同时, 水体的含盐度较低、且相对富氧, 有机质的保存条件不是十分有利, 加之陆源碎屑供给相对充足, 有机质富集的难度较大. 因此, 高的初级生产力应是造成长 9₁ 烃源层有机质相对富集的关键因素. 有机质的快速堆积、分解耗氧作用还可造成沉积物表层相对还原的环境. 因此, 应用生产力模式才能较为合理地解释长 9₁ 优质烃源岩的发育机制.

通常, 适宜的古气候、古环境——古水深、古水盐度、古水温等是水生生物——藻类等生长的基本条件, 而丰富的生物养料供给——无机营养盐的“施肥效应”则是生物勃发和高生产力的触发因素. 长 9₁ 优质烃源岩的生物来源以湖生藻类为主, 说明其沉积时的古气候、古环境是具备藻类等低等生物生长条件的. 烃源岩相对富集磷(P₂O₅ 含量为 0.50%~2.16%)、富铁(Fe 含量为 3.11%~4.38%)的特征, 说明其沉积水体中无机营养盐较为丰富. 一方面, 无机营养盐可能来自于湖盆周缘水系的汇入. 由于鄂尔多斯地区在早三叠、中三叠世时气候干燥, 以河湖相红色沉积为主^[19], 生物匮乏, 因而有可能造成物源区表层风化土壤中无机营养盐的累积, 并在雨水的作用下发生溶解、经河流水系汇入湖泊; 另一方面, 火山物质及其水解作用可能也是提供无机营养盐的重要途径, 分析结果显示, 凝灰岩的 SiO₂ 含量为 48.95%~72.87%, 应属基性、酸性喷发岩, 其低 P₂O₅ 含量(0.01%~0.04%)

和低的Fe含量(1.29%~1.90%)的特征,反映了P, Fe等元素可能已通过水解作用进入沉积水体,并成为生物营养的重要来源之一。

此外,地质事件可能对长 9_1 烃源岩的发育有着重要影响,4号样品Eu的显著正异常反映出同期存在缺氧的地质事件。在里56井的长 9_1 岩芯观察中发现了灰色砂质泥岩段中夹有约10 cm的黑色泥岩,岩性纯,手感较轻,未见高等植物的碳屑。这一现象说明地质事件可能在长 9_1 优质烃源岩的形成起着重要作用。

4 结论

长 9_1 黑色泥、页岩层的有机质丰度高,有机母质类型好,处于生油高峰演化阶段,是一套优质烃源层。该套优质烃源层发育于淡水-微咸水、弱氧化-弱还原的半深湖沉积环境。高的初级生产力是该套优质烃源层形成的主要因素。凝灰岩、纹层状凝灰岩的沉积,出现Eu显著正异常的现象,反映出同期可能存在与火山喷发活动有关的缺氧地质事件,并且对优质烃源层的发育起着重要的作用。因此,同期湖盆中水质较深的半深湖沉积相带(局部凹陷)应是该套优质烃源层发育的主要区带。

参 考 文 献

- 陈践发,孙省利,刘文汇,等.塔里木盆地下寒武统底部富有机质层段地球化学特征及成因探讨.中国科学D辑:地球科学,2004,34(增刊I):107—113
- 张林晔,孔祥星,张春荣,等.济阳坳陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义.地球化学,2003,32(1):35—42
- 孙省利,陈践发,刘文汇.海底热水活动与海相富有机质层形成的关系——以华北下马岭组为例.地质论评,2003,49(6):588—595
- 朱光有,金强.东营凹陷两套优质烃源岩地质地球化学特征研究.沉积学报,2003,21(3):506—512
- Stein R, Rullkötter J, Welte D H. Accumulation of organic carbon-rich sediments in the Late Jurassic and Cretaceous Atlantic Ocean- A synthesis. Chem Geol, 1986, 56: 1—2, 1—32[DOI]
- Frimmela A, Oschmann W, Schwark L. Chemostratigraphy of the Posidonia Black Shale, SW Germany I. Influence of sea-level variation on organic facies evolution. Chem Geol, 2004, in press
- 张文正, 笱川莉. 烃源岩残留沥青中正构烷烃分子的碳同位素研究. 沉积学报, 1997, 15(2): 212—215
- 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. 沉积学报, 2004, 22(2): 365—372
- 王争鸣. 缺氧沉积环境的地球化学标志. 甘肃地质学报, 2003, 12(2): 55—58
- 陈衍景, 邓健, 胡桂兴. 环境对沉积物微量元素含量和配分型式的制约. 地质地球化学, 1996, (3): 97—105
- 黎彤, 倪守斌. 地球和地壳的化学元素丰度. 北京: 地质出版社, 1990. 44—51
- Corbett R E, Smith R A. lichens and fungi. Part VI. Dehydration rearrangements of 15-hydroxyhopanes. J Chem Soc(C), 1969, 44—47
- Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1993
- 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社, 2001. 36—37
- 张水昌, 张保民, 王飞宇, 等. 塔里木盆地两套海相有效烃源层——I. 有机质性质, 发育环境及控制因素. 自然科学进展, 2001, 11(3): 261—268
- Pichevin L, Bertrand P, Boussa M, et al. Organic matter accumulation and preservation controls in a deep sea modern environment: an example from Namibian slope sediments. Org Geochem, 2004, 35: 543—559[DOI]
- Reed J D, Iuich H A, Horsfield B. biological evolutionary significance of Ordovician oils and their source. Org Geochem, 1986, 10(6): 347
- Jacobson S R, et al. Middle Ordovician organic matter assemblages and their effect on Ordovician-derived oils. AAPG Bulletin, 1988, 58: 499
- 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油工业出版社, 2003. 88—91