

相对海平面变化对烃源岩发育的影响

——以鄂尔多斯盆地为例^{*}

腾格尔^{1,2} 刘文汇³ 徐永昌⁴ 陈践发⁵

(1. 南京大学地球科学系 2. 中国石化石油勘探开发研究院无锡实验地质研究所

3. 中国石化石油勘探开发研究院 4. 中国科学院兰州地质所 5. 石油大学)

腾格尔等. 相对海平面变化对烃源岩发育的影响——以鄂尔多斯盆地为例. 天然气工业, 2005; 25(5): 9~13

摘要 以鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系马家沟组为例, 应用碳酸盐岩碳氧同位素、有机碳含量及其同位素组成, 结合地层、古生物特征, 探讨相对海平面变化对海相碳酸盐岩有机质富集及烃源岩发育的影响。研究表明, 桌子山地区受贺兰裂谷的强烈沉降, 克里摩里期相对海平面上升幅度较大, 引起一系列利于有机质富集和烃源岩发育的结果: ①静水、缺氧环境; ②有机质埋藏量增加和质量优化; ③碳酸盐碳、氧同位素值偏重, 而有机碳同位素值偏轻。在岐山地区, 相对海平面波动较小, 为浅水、氧化环境, 不利于有机质保存。对一个地区或盆地而言, 相对海平面变化是全球性海平面升降和区域性构造活动的综合效应, 它通过改变古环境控制了有机质富集及烃源岩发育。因此, 相对海平面变化的研究对海相烃源岩的发育程度及其分布预测具有重要意义。

主题词 相对海平面 区域构造 烃源岩 碳氧同位素 奥陶纪 鄂尔多斯盆地

马家沟组碳酸盐岩是鄂尔多斯盆地中部气田的主要产层之一, 是奥陶系覆盖全盆地的唯一沉积层, 也是下古生界烃源岩研究的重点。目前, 对该套海相沉积是否为有效烃源岩尚存分歧, 但多数学者^[9~11] 承认中部大气田有下古生界的贡献。

笔者在桌子山、岐山剖面上选取新鲜样品 25 个进行了有机碳含量(TOC)、有机质碳同位素($\delta^3\text{C}_{\text{org}}$)和碳酸盐岩碳同位素($\delta^3\text{C}_{\text{carb}}$)、氧同位素($\delta^8\text{O}$)测定。上述样品按分析要求预处理后, 有机碳含量用 CS-344 型碳硫测定仪测试, 分析精度为 $\pm 0.5\%$; 碳酸盐岩碳、氧同位素使用 MAT-252 质谱仪测试; 有机碳同位素, 先将样品用 10% 盐酸浸泡 24 h, 除去无机碳, 然后在 800 °C 下充分燃烧, 所生成的 CO_2 送 MAT-252 质谱仪测定。同位素测值采用 PDB 标准, 精度 $\pm 0.2\text{‰}$ 。上述测试均由中科院兰州地质研究所气体地球化学重点实验室完成。由于篇幅所限, 有关样品蚀变程度的评估详见参考文献[13]。

一、相对海平面变化及其碳同位素响应

1. 相对海平面变化

鄂尔多斯盆地受加里东运动及全球性海平面升降作用的影响, 早古生代发生了两次海侵, 奥陶纪海侵是其中较大的一次海侵, 总体上从冶里—亮甲山期开始, 早马家沟期扩大, 晚马家沟期达到高潮^[14]。冯增昭等(1998)^[12] 通过岩相古地理研究将奥陶纪海侵分为 3 个演化阶段, 第一阶段, 冶里期和亮甲山期是一个海退阶段; 第二阶段, 马家沟期为海进阶段, 又分出 3 个次级旋回, 即马一期和马二期旋回, 马三期和马四期旋回, 马五期和马六期旋回, 其中马一期、马三期和马五期为马家沟期海进阶段中的相对海退期, 以白云岩、膏盐发育为主, 而马二期、马四期和马六期为相对海进期, 以灰岩发育为主; 第三阶段, 平凉期和背锅山期进入海退期。显然, 鄂尔多斯盆地奥陶纪的海侵具有显著的多旋回性, 表现为多次相对海平面的波动。这种波动不仅体现于沉积

^{*} 国家重点基础研究发展规划(973)项目(编号:2001CB209102, G1999043306)资助。

作者简介: 腾格尔, 1967 年生, 高级工程师; 2004 年毕业于中国科学院兰州地质研究所中国科学院研究生院, 获博士学位, 现在南京大学中石化石油勘探开发研究院无锡博士后工作站工作, 主要从事地球化学及油气地质研究。地址: (214151) 江苏省无锡市惠钱路 210 号。电话: (0510) 3201571。E-mail: tenger67@sohu.com

学、古生物学等宏观特征上,还反映在碳氧同位素、微量元素等地球化学特征上。

2. 相对海平面变化的碳同位素响应

碳同位素组成由于在成岩过程中基本保持不变,可以反映原始海洋碳同位素特征^[15,16],故其应用尤为广泛。国内外研究表明^[1,2,17~19], $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值与海平面变化呈正相关关系, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 的正偏移与海平面上升有关,而负偏移则意味着海平面下降,究其原因多数学者将古气候、风化作用、生物生产力和有机碳的埋藏量结合起来综合解释。一般认为温暖潮湿气候期间,海平面上升,生物生产力和有机质埋藏量增加,使富集轻同位素的有机碳大量储存于沉积物中,引起碳酸盐岩碳同位素的偏重,反之亦然。Vahernkamp V C 等(1996)^[20]根据 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 地层曲线重建了阿拉伯海湾早白垩纪海平面波动,正向、负向波动分别与海平面相对上升和下降相对应, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值呈相对平稳状,则暗示海平面的波动幅度不大,处于相对稳定状态,揭示了地质剖面上碳同位素组成的演化趋势与其地层层序及相对海平面具有同步变化形式。国内文献中也曾有“海平面变化曲线与其碳同位素变化曲线基本一致”的报道^[21,22]。

由图1可知,岐山剖面上,马家沟组 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值为 $-1.5\text{‰} \sim 0.3\text{‰}$,马一段至马六段总体具上升趋势

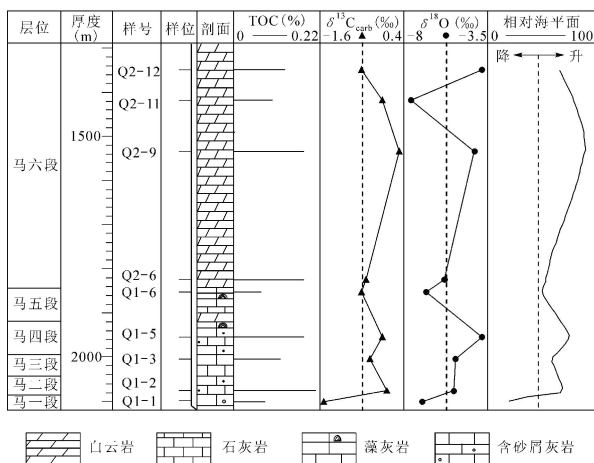


图1 岐山剖面马家沟组有机碳含量、碳氧同位素组成及相对海平面变化趋势

的背景上呈3次波动,分别对应于马一段至马二段、马三段至马四段和马五段至马六段。这与该区马家沟期“三进、三退”三级海平面变化趋势相吻合^[12]。基于上述讨论,可以认为这一碳同位素曲线变化反

映了马家沟期整体为海进的背景上相对海平面波动情况,同位素相对降低的层段对应相对海平面下降期,反之为上升期。同时,结合地质实际考虑,该区尽管各段间相对海平面表现出一定波动,但总体变化幅度不大,海水较浅,沉积界面仍处于氧化—还原界面之上。

如图2所示,桌子山剖面上, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值自桌子山组下部(-1.5‰)向上持续上升,到克里摩里组则快

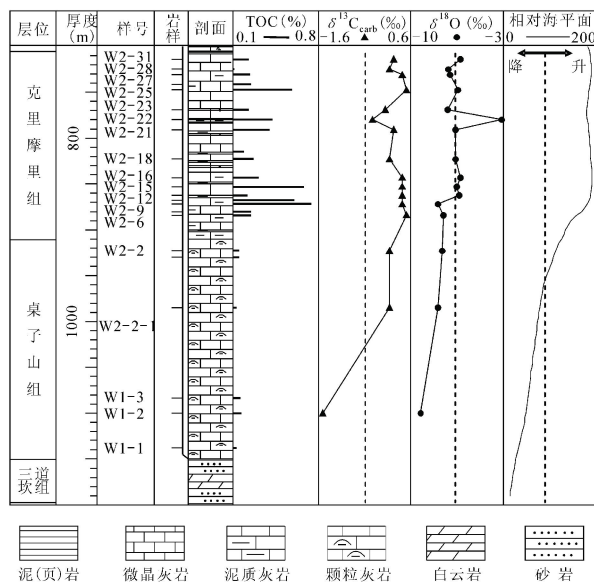


图2 桌子山剖面有机碳含量、碳氧同位素组成及相对海平面变化趋势

速上升至 $0.4\text{‰} \sim 0.5\text{‰}$,偏移 2.0‰ ,呈正向波动。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值在克里摩里组内除了中部有较小波动外,上下两段保持为 $0.2\text{‰} \sim 0.5\text{‰}$ 。由此推断,在桌子山地区,三道坎期为滨浅海环境,从桌子山期开始,海平面逐渐上升,水体加深,到克里摩里期上升速率加快且幅度较大。这与沉积相、古生物等特征基本相符。三道坎组以石英砂岩为主,沉积于滨浅海,其上覆桌子山组不再有砂岩等,而灰岩层厚度增加且质纯,从富含三叶虫、头足类和腕足类等化石综合分析,该沉积时期水深有增加的趋势^[23]。此时,牙形石组合虽以华北型为主,却开始混有华南型,这也说明海水深度较前期有所增加^[24]。早奥陶世末期的克里摩里期,从岩性和生物群组合面貌上都发生了较大变化,岩石的颜色因水体循环不佳而呈灰黑色、毫米级纹层发育、黑色页岩开始出现、底栖生物群的分异度和丰度都明显降低,并被放射虫和笔石所取代,这些都充分说明海水深度继续加深^[23]。牙形石的组合

面貌都是清一色的北大西洋类型也证实这一点^[24]。克里摩里期生物以笔石、钙球和放射虫等为主,说明水体较深^[12],周志毅等(1995)^[25]估计深度为200 m。进一步研究克里摩里组笔石相发育、黄铁矿丰富等特征,认为克里摩里期水体较深,沉积界面处于氧化—还原界面之下。据此,结合关士聪等(1988)^[26]中国古海域沉积环境综合模式推测,在桌子山地区,相对于三道坎期海平面,克里摩里期海平面上升幅度较大(达百余米),较岐山地区同期海平面变化更为显著。

另外,该剖面上 Rb/K、 $\delta^8\text{O}$ 值与 $\delta^3\text{C}_{\text{carb}}$ 值的变化趋势相似(图2)同样支持上述分析^[27]。随着海水不断侵入,盐度渐增,进入克里摩里期后,由于水体明显加深,加之特殊的古地理环境使该区海水循环受限制(当时处于贺兰裂谷靠盆地一侧的边缘上,三面被古陆或隆起包围,即西、北部有阿拉善和伊盟古陆环绕,东侧被水下中央古隆起阻隔,呈半封闭状态),导致水体层化,底部水体缺氧,盐度提高,其 Z 值达124~125,而桌子山组下部的 Z 值仅为120^[27]。

上述碳、氧同位素曲线、微量元素和地质特征等基本勾勒出桌子山地区由早奥陶世早期至晚期的相对海平面变化过程(图2),其沉积环境由开放型的滨浅海逐渐向较封闭的次深海环境过渡。

综上所述,在同一海进阶段,岐山和桌子山地区马家沟组各层段所对应的相对海平面变化迥然不同,这主要归因于二者构造沉降程度的差异。据鄂尔多斯盆地构造演化史,至早奥陶世,鄂尔多斯地块内部北东向裂谷完全消亡。与此相反,在该盆地西缘,贺兰裂谷受祁连裂谷早古生代强烈发育的影响反而继续扩大,在中奥陶世达到高潮,成为鄂尔多斯和阿拉善地块劈开的楔形裂谷,导致海水沿裂谷侵入^[28]。同时,在裂谷肩处发生均衡翘升,加之鄂尔多斯地块隆起的复合作用,在盐池—环县—庆阳一带形成了近“L”型水下隆起,现称之为中央古隆起^[9]。在整个马家沟期的海进阶段中,桌子山地区的相对海平面变化明显受贺兰裂谷的再度活动控制,即该裂谷在克里摩里期起表现为强烈沉降,引起其相对海平面快速、较大幅度上升,沉积环境由浅海(陆棚)变为次深海(斜坡)环境^①;而南缘岐山及中部地区与桌子山地区隔中央古隆起相望,构造相对稳定,古地理相对平缓,致使相对海平面及水深变化幅度不大,整体仍处于浅水环境。可见,对一个地区或盆地来

说,相对海平面变化的评价研究比全球海平面更具实际意义。

二、相对海平面变化的油气地质意义

上述相对海平面变化引发了一系列具有重要油气地质意义的结果,主要如下。

(1)生物群及生产力:在桌子山地区,克里摩里期相对海平面较大幅度上升,导致了生态转化,使生物群由桌子山期的底栖生物丰富变为克里摩里期的底栖生物缺乏,代之以浮游生物为特征,海平面上升所带来的丰富营养物质,使浮游生物大量繁盛,造成高生产力,为有机质富集提供了充足的物质基础。这与 $\delta^3\text{C}_{\text{carb}}$ 值正向偏移的环境内涵相符。 $\delta^3\text{C}_{\text{carb}}$ 值的正向偏移通常反映生物生产力和有机质埋藏量增加,其根本原因是缺氧的沉积环境^[6,15,29]。从食物链考虑,笔石等群体动物的繁盛同样暗示着其主要食料—浮游植物的繁盛。根据岐山马家沟期相对海平面变化,结合马家沟组中底栖动物化石缺乏及藻灰岩(叠层石)发育,可以认为该区生物群以底栖藻类占优势。有机质碳同位素分析结果也支持这一结论^[30]。

(2)水动力条件:在桌子山剖面上,随着海平面的大幅度上升,水动力条件由桌子山期生物扰动强烈、动荡环境转为克里摩里期静水环境,后者利于粘土、有机质等悬浮—细粒物质沉淀、积聚,与其发育薄纹层状微晶灰岩、泥灰岩和黑色页岩等地质实际吻合。Zr/Rb 值等微量元素特征亦印证了这一点^[27]。由于灰泥、粘土等细粒物质渗透率较低,限制了含氧海水和孔隙水循环,使得有机质更好地保存,该组微晶灰岩和泥(质)灰岩的 TOC 高达0.58%~0.74%,顶部黑色页岩 TOC 为1.25%。桌子山组和岐山马家沟组总体上沉积于浅水、动荡环境,有机质保存条件差,TOC 普遍小于0.20%。但其粗粒灰岩、角砾灰岩和蒸发岩等的发育,又可为油气成藏提供良好的储、盖层。

(3)氧化还原条件:在桌子山地区,早奥陶世晚期相对海平面大幅度上升与其薄层灰岩、黑色页岩、笔石和黄铁矿等的大量发育以及相对应的 $\delta^3\text{C}_{\text{carb}}$ 正向偏移等同步变化并非偶然,其间必然存在内在联系。该区相对海平面的这种变化可引起水体分层,底部水体缺氧,沉积界面处于氧化—还原界面之下。过渡金属含量及 $V/(V+Ni)$ 比值等微量元素特征

也表明此类环境的存在^[27]。该环境的形成,一方面,抑制底栖生物的发育,降低有机质的氧化分解速率,提高有机质埋藏量和保存率;另一方面,在厌氧细菌活动下,沉积有机质中类脂组分被优先保存和富集,使有机质类型倾向于腐泥型(I型),表现在有机碳同位素的偏轻($\delta^3\text{C}_{\text{org}} \leq -28\text{‰}$)。然而,桌子山组和岐山马家沟组,即使在相对海进期,其沉积环境仍以氧化为主,二者过渡金属普遍缺乏富集、 $V/(V+Ni) < 0.46$ 等微量元素特征是该区缺乏缺氧条件的强有力证据^[27]。其有机碳同位素值明显偏重($\delta^3\text{C}_{\text{org}} > -26\text{‰}$),说明有机质类型为偏腐殖型^[31]。

由此可见,上述生态、沉积环境参数对有机质富集和海相烃源岩发育均有显著影响,相对海平面变化通过改变这些参数来控制烃源岩发育程度及展布规律。我们注意到,伴随海平面的较大幅度上升,克里摩里组发育了有机质含量较高的层段,TOC为 $0.11\% \sim 1.25\%$,平均为 0.28% (剔除高值 1.25%),60%的样品 $\text{TOC} > 0.2\%$,腐泥型有机质,生烃潜力高^①,具备有效烃源岩发育条件。而桌子山组TOC为 $0.13\% \sim 0.17\%$,远低于克里摩里组。岐山剖面马家沟组有机质特征与桌子山组相似,均不具备有效烃源岩发育条件。

值得注意的是,海相烃源岩的发育并非是相对海平面变化的简单函数,还应综合考虑与区域构造的复合效应。就西缘乌拉拉克组黑色页岩发育、较高的有机碳含量($0.53\% \sim 0.88\%$)及生烃潜力来看^①,平凉期尽管整体处于海退期^[12],但其沉积学、古生物学特征表明,盆地西缘仍处于深水(斜坡)沉积阶段,其早期表现为缺氧沉积,利于烃源岩发育。在盆地中东部地区,受马家沟期相对海平面变化的影响,马家沟组部分层段发育泻湖相或高盐、局限环境,沉积了一套以局限海沉积为主的碳酸盐岩及蒸发岩地层,其中既有重要储集层,也有中部气田的源岩^[9,10]。因此,烃源岩的发育程度及分布主要取决于盆地区域构造和相对海平面的变化程度。

三、结 论

在桌子山地区,由于贺兰裂谷的强烈沉降,克里摩里期相对海平面上升幅度大,导致生态、沉积环境发生了显著变化,沉积了一套有机碳含量较高,有机质类型好的层段,可视为潜在有效烃源岩。在岐山地区,马家沟组相对海平面变化幅度较小,总体仍为

浅水、氧化环境,其有机质保存率低,不利于烃源岩发育,但此类条件可形成良好的储盖层。

就一个地区或盆地而言,相对海平面变化是全球性海平面升降和区域性构造活动的综合效应,它通过改变古环境因素控制了有机质富集及烃源岩发育。因此,相对海平面变化的研究对海相烃源岩的发育程度及其分布预测具有重要意义。

文中参考的内部资料:①陈践发、吉利明、妥进才、腾格尔、王杰、窦启龙,鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系海相烃源岩生烃评价,中科院兰州地质研究所及长庆油田勘探开发研究院,2002。

参 考 文 献

- 1 Jenkyns H C, Gale A S, Corfield R M. Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the English Chalk and Italy Scaglia and its palaeoclimatic significance. *Geol. Mag.*, 1994;131(1):1—34
- 2 Wenzel B, Joachimski M M. Carbon and oxygen isotope composition of Silurian branchiopods (Gotland /Sweden): palaeoceanographic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996;122:143—166
- 3 Fluteau F. Earth dynamics and climate changes La dynamique terrestre et les modifications climatiques. *Comptes Rendus Geoscience* 2003;335:157—174
- 4 Caus E, Teixell A, Bernaus J M. Depositional model of a Cenomanian—Turonian extensional basin (Sopela Baisn, NE Spain): interplay between tectonics, eustasy and biological productivity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997;129:23—36
- 5 尹观,王成善.西藏南部中白垩世黑色页岩的碳氧同位素组成及大洋缺氧事件的讨论. *矿物岩石*, 1998;18(1):95—101
- 6 万晓樵,刘文灿,李国彪等.白垩纪黑色页岩与海水含氧量变化——以西藏南部为例. *中国地质*, 2003;30(1):36—47
- 7 Posamentier H W, Summerhayes C P, Haq B U, et al. *Sequence Stratigraphy and Facies Associations*. Spec Publ 18 of IAS, Blackwell Scientific Publications, 1993:1—108
- 8 沈安江,陈子焘,寿建峰.相对海平面升降与中国南方二叠纪生物礁油气藏. *沉积学报*, 1999;17(3):367—373
- 9 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,2002:54—56
- 10 刘德汉,付金华,郑聪斌等.鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳

- 酸盐岩生烃性能与中部长庆油田气源成因研究.地质学报,2003;78(4):542~550
- 11 陈安定.论鄂尔多斯盆地中部气田混合气实质.石油勘探与开发,2002;29(2):33~38
- 12 冯增昭,鲍志东,张永生等.鄂尔多斯奥陶纪碳酸盐岩地层岩相古地理.北京:地质出版社,1998:8~142
- 13 腾格尔.海相地层元素、碳氧同位素分布与沉积环境和烃源岩发育关系.中国科学院研究生院博士论文,2004:66~68
- 14 长庆油田石油地质志编写组.中国石油地质志(卷十二,长庆油田).北京:石油工业出版社,1992:28~39
- 15 Galimov E M 著,李红光译.生物圈碳同位素组成全球变化特点.天然气地球化学,2002;13(1-2):1~17
- 16 郑永飞,陈江峰.稳定同位素地球化学.北京:科学出版社,2000:201~204
- 17 Compton J S, Snyder S W, Hodell D A. Phosphogenesis and weathering of shell sediments from the southeastern United States: Implications for Miocene $\delta^{13}\text{C}$ excursions and global cooling. *Geology*, 1990; 18: 1227~1230
- 18 沈渭洲,方一亭,倪琦生等.中国东部寒武系与奥陶系界线地层的碳氧同位素研究.沉积学报,1997;(4):38~42
- 19 朱井泉,李永铁,江茂生等.藏北措勒盆地早白垩世 Aptian-Albian 浅水碳酸盐岩碳同位素组成及其意义.中国科学(D辑),2003;33(3):216~222
- 20 Vahernkamp V C. Carbon Isotope Stratigraphy of the Upper Kharaib and Shuaiba Formations: Implications for the Early Cretaceous Evolution of the Arabian Gulf Region. *AAPG Bull.* 1996;80(5):647~662
- 21 李玉成.华南晚二叠世碳酸盐岩碳同位素旋回对海平面变化的响应.沉积学报,1998(3):52~57
- 22 江茂生,朱井泉,陈代钊等.塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应.中国科学(D辑),2002;32(1):36~42
- 23 晋慧娟,李育慈,方国庆.中国古代深海沉积和遗迹化石群落.北京:科学出版社,2003:168~171
- 24 安太庠,郑昭昌.鄂尔多斯盆地周缘的牙形石.北京:科学出版社,1990:104~132
- 25 周志毅,林焕令.西北地区地层、古地理和板块构造.江苏南京:江苏南京大学出版社,1995:60~65
- 26 关士聪.中国海陆变迁、海域沉积相与油气(晚元古代—三叠纪).见:关士聪地质文选.北京:地质出版社,1988:125~148
- 27 腾格尔,刘文汇,徐永昌,陈践发.鄂尔多斯盆地奥陶系海相沉积有效烃源岩的判识.自然科学进展,2004;14(11):1249~1256
- 28 张抗.鄂尔多斯断块构造和资源.陕西西安:陕西科学技术出版社,1989:131~141
- 29 王大锐.油气稳定同位素地球化学.北京:石油工业出版社,2000:47~103
- 30 腾格尔,刘文汇,徐永昌,陈践发.海相沉积有机质的碳同位素记录及其环境意义——以鄂尔多斯盆地为例.石油勘探与开发,2004;31(5):11~16
- 31 黄第藩,李晋超,张大江.干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性.沉积学报,1984;2(3):18~33

(收稿日期 2005-01-22 编辑 黄君权)