

陆相碎屑岩旋回沉积记录中的物质响应及聚集规律 ——以济阳坳陷王家岗地区古近系孔店组为例

谭先锋^{1,2}, 田景春², 黄建红³, 林小兵², 马建伟⁴

(1. 重庆科技学院 石油与天然气工程学院, 重庆 401331; 2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059;
3. 中国石油 青海油田公司 勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202; 4. 中国石油 新疆油田公司 石西油田作业区, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 旋回沉积记录中包含着丰富的地质信息。以济阳坳陷王家岗地区古近系孔店组为研究对象, 开展了陆相碎屑岩旋回沉积中物质响应特征研究。结果表明, 王家岗地区湖平面逐渐收缩的陆源碎屑沉积旋回包括颜色、岩性和粒度旋回, 旋回沉积机理主要为间歇性盐湖的振荡作用。矿物旋回从灰色到红色地层, 纵向上石英含量逐渐增加, 钾长石含量逐渐增加, 斜长石含量逐渐减少, 方解石含量有所减少, 硬石膏含量逐渐增加, 矿物变化旋回与颜色旋回的变化具有较好的耦合关系。旋回变化与元素富集也具有一定的耦合关系, 纵向上常量元素中 Al, Ca, Fe, Mg 含量有增加的趋势, 微量元素中 Sr, Ba, Ga, Co 4 种元素含量有增加的趋势。旋回变化与元素含量比值也有较好的耦合关系, 特别是 Fe/Mn 和 V/Ni 比值, 呈现出多级次旋回变化的特征。研究证实了王家岗地区陆相碎屑岩旋回变化与矿物和元素含量具有较好的耦合关系, 它们直接控制了矿物和元素的富集规律。后期成岩流体改造通过物质交换, 影响旋回变化的物质响应和耦合规律。

关键词: 旋回沉积; 碎屑岩; 孔店组; 古近系; 济阳坳陷

中图分类号: TE121.1 **文献标识码:** A

Material responses and accumulation patterns in cyclic sediment records of continental clastic rocks: taking the Paleogene Kongdian Formation of Wangjiagang area in Jiyang Depression as an example

Tan Xianfeng^{1,2}, Tian Jingchun², Huang Jianhong³, Lin Xiaobing², Ma Jianwei⁴

(1. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202, China; 4. Shixi Oilfield Operation District, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Cyclic sediment records contain rich geological information. Taking the Paleogene Kongdian Formation in Wangjiagang area in Jiyang Depression as an example, this paper studied the characteristics of material response in the cyclic sediment records of continental clastic rocks. Three kinds of cycles including color, lithology and grain size were identified in the continental clastic deposits accumulated during the gradual shrinking of lake level in Wangjiagang area and the genetic mechanism of these cycles is intermittent fluctuation of the Salt Lake level. Vertically from gray to red strata, the mineral cycle features in progressively increasing contents of quartz and potassium feldspar, decreasing contents of plagioclase and calcite, and increasing content of anhydrite. The mineral cycles and color cycles have a good coupling relationship. The cycles also have a certain coupling relationship with element enrichment. Vertically, the contents of major elements such as Al, Ca, Fe and Mg have an increasing trend; while the contents of trace element Sr, Ba, Ga and Co have an increasing trend. The cycles also have a certain coupling relationship with element ratios, especially Fe/Mn and V/Ni ratios, which show multiple cycles. It is confirmed that sedimentary cycles of the continental clastic rocks in Wangjiagang area have relatively significant coupling relationship with mineral contents and element enrichment, and the former directly control the latter. Late diagenetic fluid modification influences material response and coupling patterns of the cycles through material exchange.

Key words: cyclic sedimentation, clastic rock, Kongdian Formation, Paleogene, Jiyang Depression

收稿日期: 2012-06-08; 修订日期: 2013-05-05。

第一作者简介: 谭先锋 (1982—), 男, 博士、讲师, 沉积地质学。E-mail: xianfengtan8299@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41202043, 41002032); 重庆市自然科学基金项目 (cstc2012jjA90007)。

当今岩石记录是原始沉积环境和后期成岩改造的综合反映,沉积岩及岩相古地理研究的一个重要方面就在于利用各种手段恢复当今岩石面貌的形成机理。沉积岩石旋回现象早已成为沉积地质学者所关注的对象^[1-4],地层颜色、粒度、成分等均可引起旋回变化。近年来,旋回地层学研究的突破性进展已经成为地层学研究的新的学科增长点和亮点^[5-6],成为“地层学解读时间的第三里程碑^[7]”。由于沉积节律明显受天文周期的控制或驱动,保存在地层中的旋回性沉积记录是其最好的历史见证^[8]。随着当今科技的发展,地质学领域的研究逐渐向量化、高精度化发展,旋回地层研究由大尺度向米级旋回发展,越来越趋向于研究微小旋回的变化^[9]。目前对于旋回沉积的研究主要基于不同旋回地层特征、不同尺度旋回的古气候意义等方面开展工作^[9-13]。纵观研究资料中,对于碳酸盐的“米兰科维奇”旋回研究比较成熟^[11-13],原因在于海相碳酸盐沉积对气候环境反映比较敏感,且碳酸盐成分相对简单,对气候和沉积水介质与沉积旋回具有较好的耦合关系。关于碎屑岩的旋回沉积研究,特别陆相盆地碎屑岩的旋回沉积研究相对比较难,原因在于碎屑岩的旋回物质变化与环境的耦合关系并非碳酸盐灵敏,影响因素很多。国内外也有少数学者开展过陆相湖盆碎屑岩旋回沉积研究^[14-16],Cari L Johnson 对内蒙古东南部晚中生代早白垩世断陷湖盆进行高精度旋回沉积研究^[14]。A Gurel 也发表专题论文讨论了早期冲积扇和湖泊旋回沉积的地质、矿物和地球化学特征及环境意义^[10]。文章选取济阳拗陷东营凹陷南部缓坡带王家岗地区,针对古近系孔店组红色-灰色、砂岩-泥岩旋回现象,开展断陷湖盆断陷初期旋回沉积研究。期望揭示不同旋回沉积的物质聚集及响应规律,特殊矿物和地球化学记录的原始沉积和当今岩石的物质耦合关系。

1 地质概况

济阳拗陷位于渤海湾盆地西南部地区,是华北古生代地台基础上发育而成的一个中、新生代叠合盆地。包括沾化凹陷、车镇凹陷、东营凹陷、惠民凹陷等4个次一级构造(图1)。济阳拗陷中生代受北西向左行走滑断层影响,新生代华北地区由于受印度板块与欧亚板块碰撞和太平洋板块受北北西向转为北西西向俯冲影响,夹持于喜马拉雅板块与环太平洋板块之间,处于右旋走滑-引张应力场,形成了一个受北北东和北东向断层控制的半地堑式复合盆地,叠置于中生代盆地之上^[17],形成了一系列箕状断陷盆地。盆地演化上,晚白垩世济阳拗陷在区域性左旋压扭应力场的作用下整体抬升,形成了古近系与中生界的角度不整合^[17-18],之后进入了新生代盆地演化阶段。王家岗地

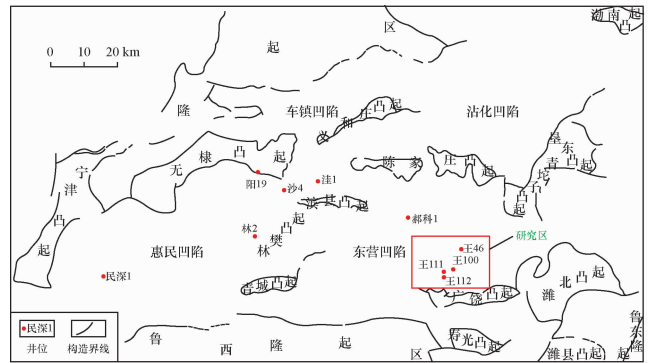


图1 研究区位置及井位分布

Fig. 1 Locations of the study area and wells

区位于济阳拗陷东南部,属于东营凹陷次一级构造单元,沉积格局属于东营箕状断陷湖盆的南部缓坡带,发育冲积扇、浅水三角洲、滨浅湖沉积。该地区孔店组中晚期接受沉积,形成了一套红色-灰色-红色,岩性上具有砂岩-泥岩互层的多旋回沉积,研究区东北部地带和西南部地带沉积充填存在一定差异。

本次研究选取王家岗地区几口典型井位,进行高频旋回分析。重点选取 W100 和 W46 进行了详细岩心观察及样品采集,薄片观察、扫描电镜、X-衍射、常量和微量元素分析,采样点如图2。采样原则为选取岩心上观察为红色和灰色岩石兼顾,粗碎屑与细碎屑兼顾。其中 W46 样品有效样品点为14个,用于元素地球化学分析的点为7个;W100 有效样品点为34个,用于元素地球化学分析的点为27个。从选择样品点来看,W100 井更有利于矿物元素分配规律的分析。并结合从胜利油田收集的 W130, W111, W135, W112 等井位的薄片资料辅助,可以满足沉积环境-岩石矿物-元素富集规律三者的耦合关系研究。

2 岩石地层旋回现象

通过研究区近30口钻井资料显示,孔店组表现出多旋回性,这种旋回主要表现在以下几个方面。

1) 颜色旋回普遍发育

孔一段到孔三段大尺度旋回表现为红色-灰色-红色的沉积旋回。沉积区孔三段普遍缺失,不发育第三段的红色岩层,总体结构普遍发育为灰色-红色地层。相当于二级层序旋回的湖侵和高位时期,表明了孔店组的二级旋回湖侵-湖退的完整过程(图2)。高频旋回也表现出灰色-红色的交替出现(图2,图3a),该类旋回主要为微观尺度的旋回效应。

图2中剖面微观结构和钻井岩心表明,颜色的变化主要表现为两种情况:(a)岩性变化与颜色同时变化,这种情况比较普遍,一般表现为砂岩类为灰色、泥岩类表现为紫红色,也有红色的砂岩和灰色的泥岩互

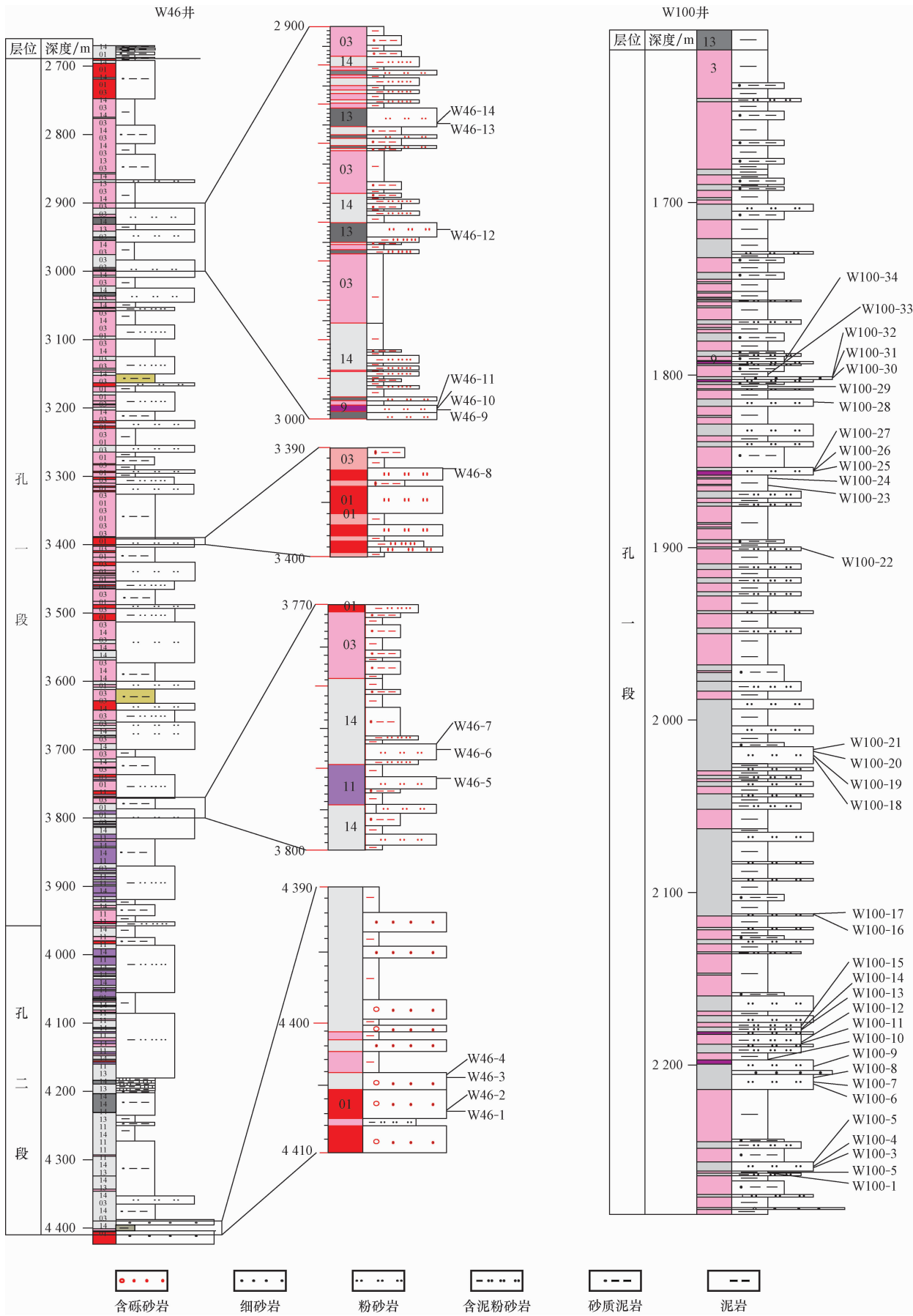


图 2 王家岗地区取样井位及样品位置
Fig. 2 Sampling well location and the sample position in Wangjiagang area

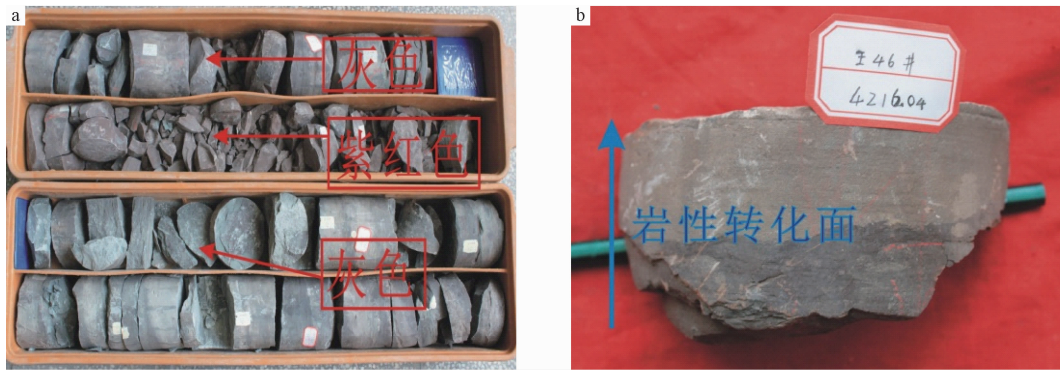


图 3 研究区旋回地层特征

Fig. 3 Cyclic stratigraphic characteristics of the study area

a. 岩性旋回变化, W46 井, 2 929. 20 ~ 2 953. 10 m; b. 岩性转化面, W46 井, 4 216. 04 m

层的变化; (b) 相同岩性的颜色旋回变化, 主要表现在紫红色泥岩和灰色泥岩的岩性变化、红色砂岩和灰色砂岩的岩性变化。颜色旋回变化主要跟气候和沉积水介质条件相关, 指示了一定的气候沉积条件。

2) 岩性及粒度旋回变化比较普遍

任何沉积盆地和沉积体系中, 均存在这样的沉积旋回, 主要表现为两种: 第一种为砂岩和泥岩的互层出现, 这种现象的发生, 主要跟物质供给和沉积共轭体系的自振荡有关^[3], 研究中发现这种岩性的转化特别普遍(图 2, 图 3b)。第二种旋回变化表现为粒度的旋回变化, 这种特征在钻井结构和岩心观察中也有所发现, 主要表现在一些浅水三角洲和滩坝沉积环境中比较普遍。沉积在碎屑岩沉积相研究中, 特别是沉积微相的变化具有重要的指示意义。

3 旋回变化与矿物响应规律

碎屑岩由碎屑颗粒、杂基和胶结物构成, 为了反映岩石内部构成与旋回沉积的耦合关系, 对几种成分进行了探讨(图 4, 图 5)。

1) 碎屑物

碎屑颗粒反映了母岩区性质和搬运距离的长短, 岩屑颗粒是矿物的集合体, 早期风化作用和搬运作用直接控制了岩屑颗粒的大小。总体来看岩石碎屑主要为变质岩的岩石碎屑。纵向演化上, 从孔店组沉积初期到晚期, 变质岩岩屑有逐步减少的趋势, 这可能跟孔店组晚期湖盆水体收缩, 搬运距离变远, 碎屑成分改造强烈导致减少有一定关系。宏观上看, 红色泥质沉积物出现的地方, 变质岩屑有减少的趋势, 但岩石碎屑颗粒对旋回地层的出现似乎影响并不太大。

2) 石英

矿物颗粒包括石英颗粒(SiO_2)和长石颗粒, 石英颗粒比较稳定(除非碱性环境下^[19]), 一般很难溶解。谭先锋等^[19]对东营凹陷孔店组成岩作用镜下特征研究后, 认为存在强烈的硅质胶结作用的石英矿物并非原生沉积。研究区石英次生加大并不是特别明显, 只在少数井(如 W111, W113)中有少量发育, 且在镜下鉴定过程中已经排除了次生加大部分的石英矿物, 因此探讨石英颗粒与旋回沉积的物质耦合关系有一定的可信度。图 4 与图 5 显示了石英颗粒纵向上逐渐增加

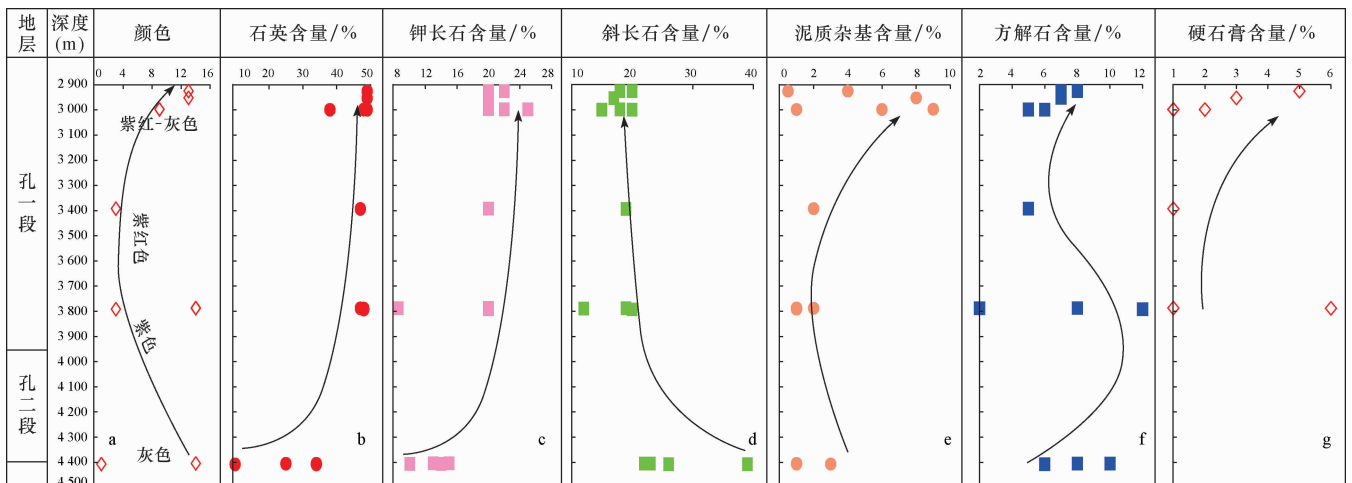


图 4 王家岗地区 W46 井沉积旋回与矿物耦合关系

Fig. 4 Coupling relationship between sedimentary cycles and mineral content of Well W46 in Wangjiagang area

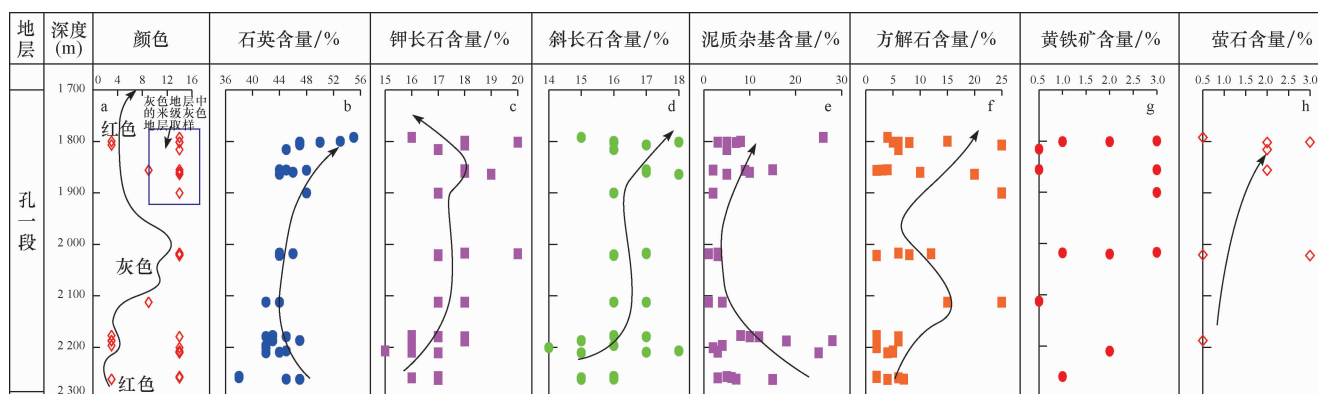


图5 王家岗地区 W100 井沉积旋回与矿物耦合关系

Fig. 5 Coupling relationship between sedimentary cycles and mineral content of Well W100 in Wangjiagang area

的趋势,沉积旋回中,表现出灰色地层的石英含量普遍较低,红色地层石英颗粒总体较高。这可能跟湖盆水体变化有一定关系,湖盆水体加深过程中,沉积物质处于还原环境下,物源区颗粒搬运到该沉积区的碎屑颗粒随之减少(这点也能从变质岩屑变化上体现),石英颗粒很少能到达该沉积区;湖盆水体上涨过程中,沉积物质处于氧化环境。碎屑物质经历了长距离的搬运,成分成熟度大大提高,因此石英含量有所升高。

3) 长石

矿物颗粒中的长石包括钾长石和斜长石,该类型颗粒变化情况非常复杂。利用现今岩石的长石含量来试图建立与原始沉积环境的耦合关系并不理想^[20]。原因在于,长石在在地层成岩演化过程中要发生溶解。根据黄思静教授等^[21]提出的成岩过程中长石与粘土矿物的物质交换机制,认为同生期到埋藏初期,斜长石比钾长石更容易溶解;埋藏期如果沉积物中存在大量同期火山物质蒙皂石,钾长石比斜长石更容易溶解,而一般缺乏原生蒙皂石的地层,钾长石通常比斜长石更容易保存。通过大量的薄片资料分析,研究区孔店组长石含量较高,溶蚀作用发生较少,长石的含量基本反映了纵向的变化特征。图4,图5显示了长石的纵向变化:(a)两类长石均有较高的含量,钾长石总体比斜长石含量稍高,这是由于斜长石比钾长石更容易溶解;(b)从旋回变化上看,两口井的纵向变化有差异,W46井灰色地层钾长石有比红色地层钾长石含量更少的趋势,这可能跟石英颗粒的沉积原理类似,湖盆水体收缩,搬运距离变远,搬运过程中比较稳定的钾长石就更容易保存下来。W100井灰色地层总体比红色地层钾长石更高的趋势,这主要是因为W100比W46更靠近物源区,受搬运风化作用影响较小有关;(c)斜长石变化也有差异,W46井灰色地层钾长石有比红色地层钾长石更高的趋势,这与该井的钾长石正好相反的趋势,这跟石英颗粒的变化趋势有一定的耦合关系,因为红色地层湖盆收缩,物质搬运距离较远,稳定性较差的斜

长石更容易溶解。值得关注的是W100斜长石含量基本与钾长石有类似的变化趋势,均显示了红色地层斜长石总体比灰色地层斜长石含量更低趋势,这一点两口井的变化趋势比较吻合。

4) 胶结物

胶结物的物质分配方式更加复杂,原因在于多数胶结物为成岩演化过程中的产物,与旋回沉积并没有太大联系。但有两种胶结物值得关注,一类是方解石胶结,另一种是硬石膏胶结。研究区方解石和硬石膏胶结比较发育^[19-24],图4图5显示了方解石纵向上的演化,特征表现为红色层方解石胶结稍微低,灰色地层方解石稍高,硬石膏胶结特征表现为红色地层硬石膏普遍发育,灰色地层硬石膏不发育或者是很少,表现出了对沉积旋回比较灵敏的耦合关系。研究中也发现了一定数量的黄铁矿、萤石、硅质、重晶石等胶结,图5显示了黄铁矿胶结和萤石胶结与旋回变化并没有良好的耦合关系,这可能与后期的热液流体作用有关,形成了这类特殊的胶结物类型。

5) 粘土矿物

粘土矿物对沉积水介质和沉积气候条件比较敏感,并且伴随着与成岩流体之间的物质交换,粘土矿物要发生变化,最常见的是蒙皂石向伊利石的转化,导致利用粘土矿物定量测定其与沉积旋回的关系难度加大。刘志飞教授等^[22]利用粘土矿物来对南海第四纪沉积物进行物源分析和气候演化研究,对应于气候的各个级次的旋回变化,粘土矿物特征有响应的响应特征。研究区粘土矿物(粘土杂基)从总量上看含量较低(图4,图5),红色地层粘土杂基总体较高。总量的变化除了跟沉积环境有关外,还跟所取的岩石类型有关系,因此粘土杂基总量与沉积旋回的耦合关系并不是很好。然而,不同沉积环境发育的粘土矿物组合具有明显差异。X-衍射资料显示(表1),W46井上部红色岩层的高岭石和绿泥石含量较高,下部灰色岩层的高岭石和绿泥石含量较低,这与应凤祥教授等^[21]提

表 1 研究区孔店组粘土矿物 X-衍射分析

Table 1 X-ray diffraction analysis of clay minerals of the Kongdian Formation in the study area

井号	井深/m	层位	岩石类型	粘土总量/%	粘土矿物相对含量/%				伊/蒙间层比
					伊/蒙间层	伊利石	高岭石	绿泥石	
W46	2 924. 83	孔店组	粉砂质极细粒长石砂岩	4. 00	15	17	19	49	20
	2 997. 10		极细粒岩屑长石砂岩	11. 00	33	20	19	28	20
	3 787. 69		中粒岩屑长石砂岩	5. 00	24	20	15	41	20
	3 791. 35		含灰质极细粒长石砂岩	7. 00	44	32	11	13	20
	4 116. 31		泥云质极细粒岩屑长石砂岩	47. 00	23	68	3	6	10
WX131	2 254. 96	孔店组	泥质粉砂质极细粒岩屑长石砂岩	15. 00	73	13	8	6	55
	2 368. 00		极细粒岩屑长石砂岩	4. 00	62	22	8	8	20
W100	1 855. 95	孔店组	极细粒岩屑长石砂岩	8. 00	69	14	9	8	60
	2 017. 00		极细粒长石砂岩	4. 00	48	34	9	9	50
	2 112. 50		灰质极细粒岩屑长石砂岩	8. 00	71	14	7	8	55
	2 177. 25		细粒岩屑长石砂岩	11. 00	52	22	13	13	50
	2 196. 70		细粒岩屑长石砂岩	4. 00	23	12	38	27	20
	2 262. 00		细粒岩屑长石砂岩	7. 00	64	14	16	6	55

出的盐湖或干旱环境条件下,蒙脱石向伊利石和绿泥石转化的观点是比较吻合的;W100 井的高岭石含量变化在下部的灰色地层含量较高,上部红色地层含量较低,也证实了下部灰色地层旋回的酸性水介质沉积环境,上部为酸性-碱性的沉积环境。

可以看出,砂-泥岩中的旋回变化与矿物之间有一定的耦合关系,这种耦合关系并非简单的线性关系。总体来讲,碎屑物质(石英、长石、岩屑、重矿物)反映了搬运分选、物质来源等,粘土杂基含量反映了水动力的强弱变化,但由于粘土杂基后期成岩演化造成了物质变化和迁移;胶结物比较复杂,一方面,部分胶结物反映了沉积条件,另一方面,后期的成岩流体也起到了重要的胶结作用,不能简单加以运用。

4 旋回变化与元素富集规律

用沉积地球化学方法分析沉积环境已经越来越得到沉积地质学家的重视,对于陆相盆地,特别是湖泊沉积环境,不同的沉积水介质条件和气候条件,对元素的

富集有着重要的影响。某些沉积矿产在这种情况下发生。正如矿物质的富集规律一样,某些元素对沉积环境的反映可能更加有效。值得注意的是,元素特征除了跟原始沉积环境有关外,还跟后期成岩系统的封闭性有关系,外来流体的进入对沉积岩石的改造将改变元素分布规律。为了分析沉积旋回与元素的物质耦合关系,重点选取 W100, W46, W135 三口井部分样品进行了常量元素和微量元素分析。

1) 常量元素

常量元素特征表现出一定的规律(图 6),Al 的含量在红色岩层地区总体比较高,灰色地层含量较低,从下到上的演化为逐渐升高,主要受向上水体逐渐变浅,氧化环境所致。Ca 的变化比较为红色地层总体较低,灰色地层含钙质稍高,与旋回变化耦合关系并不是很好,可能跟后期改造有关系,但总体变化表现出从下到上有升高的趋势。Fe 的含量从下到上表现出逐渐升高的趋势,湖盆水体变浅出现的氧化环境比较耦合。Mg 和 Na 并没有太明显的耦合关系。K 离子却表现出从下到上有旋回升高的趋势。K 的含量变化影响因素

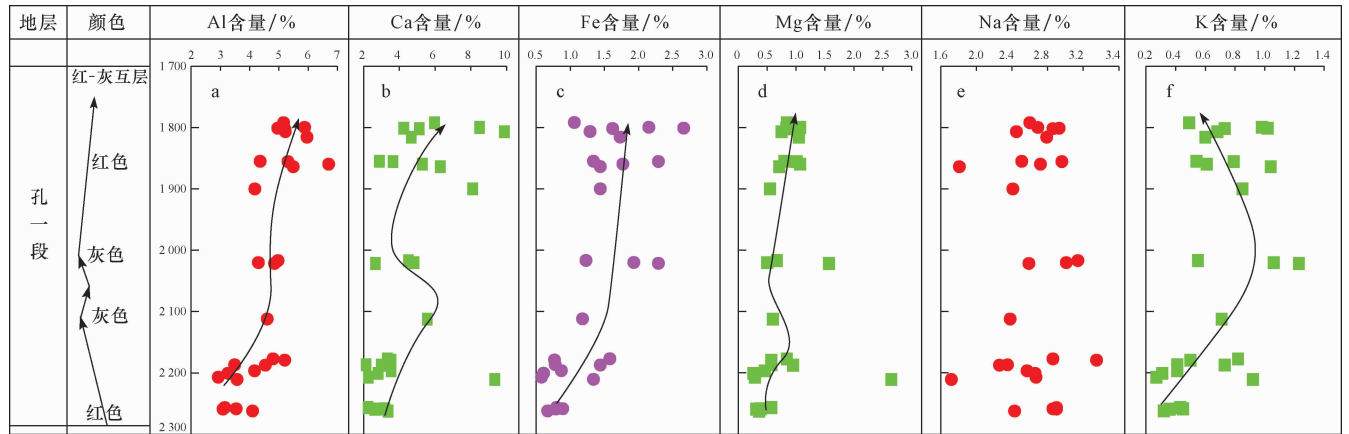


图 6 王家岗地区 W100 井旋回与常量元素耦合关系

Fig. 6 Coupling relationship between sedimentary cycles and major element content of Well W100 in Wangjiagang area

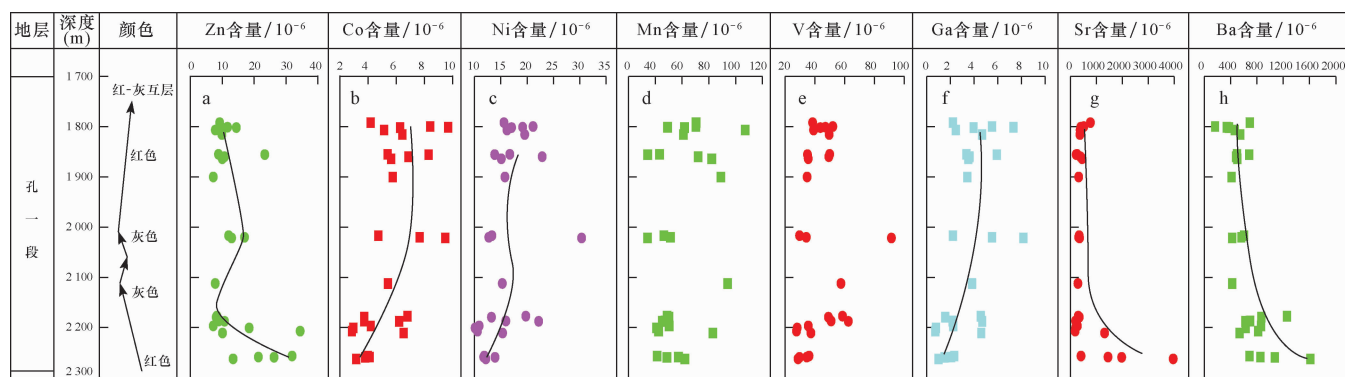


图7 王家岗地区 W100 井旋回与微量元素耦合关系

Fig. 7 Coupling relationship between sedimentary cycles and trace element content of Well W100 in Wangjiagang area

比较多,在开放的成岩环境中,K 离子由于长石的溶解或者粘土矿物的溶解会被带走,因此,K 的含量可能与沉积旋回的耦合关系可能会受到影响。

2) 微量元素

微量元素元素的变化呈现出一定规律(图7),Zn 的含量明显表现出旋回变化,与颜色旋回变化比较耦合;Co 和 Ni 的含量从下到上的演化,有主见增大的趋势,说明氧化环境更有利于两种元素的富集;Mn 和 V 的变化没有表现出明显的规律性;Ga 的含量总体趋势也表现出从下到上主见升高的趋势,明显红色地层更有利于 Ga 的富集;值得重视的是 Sr 和 Ba,两种元素从下到上则呈现出主见减少的趋势,说明水体较深的还原环境更有利于两种元素的富集,而上部的氧化环境不利于该元素的富集。图8 也显示紫红色地层中 Sr 元素比 Ba 元素更富集;灰色地层中比较红色地层中更富集 Mn 元素和 Ba 元素。

3) 元素比

元素的富集规律与环境的变化的可以用元素的比值方法来进行研究,一方面利用元素比值法可以很好的研究沉积旋回及环境变化过程,另一方面也可以进一步确定旋回变化过程中的元素富集规律。

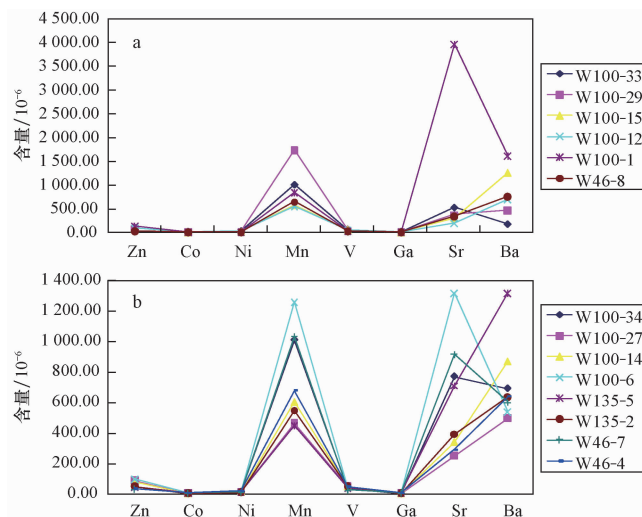


图8 研究区孔店组不同颜色旋回元素富集规律

Fig. 8 Element enrichment patterns of different color cycles of the Kongdian Formation in the study area

a. 紫红色地层; b. 灰色地层

a) Sr/Ba 指数

陆相中,Sr 的含量随盐度的增加有明显增大的趋势。图9 显示,Sr/Ba 总体小于1,证明了陆相环境,且红色地层比较高,说明了氧化环境的盐度较高,水体

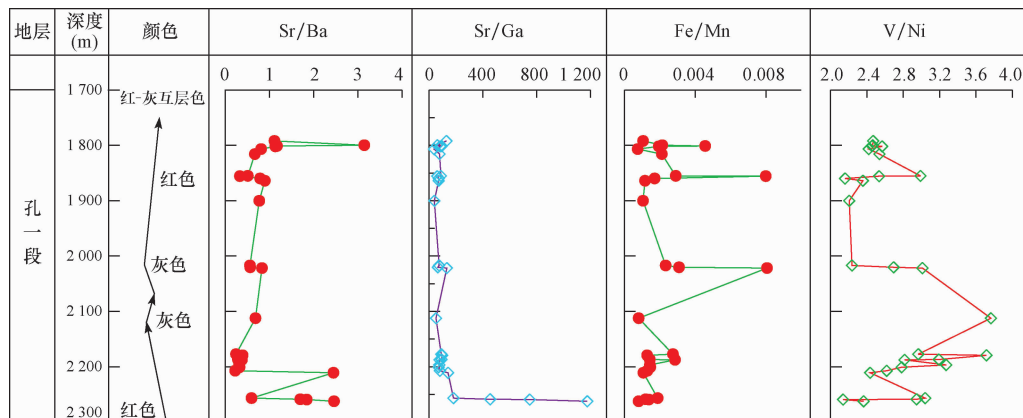


图9 研究区孔店组元素比值特征

Fig. 9 Element ratio characteristics of the Kongdian Formation in the study area

浓缩,有利于 Sr 的富集。

b) Sr/Ca 指数

该指数可以反映古盐度,在海相沉积物中为低值,在陆相沉积物中高值。泥岩中粘土矿物的离子交换能力会明显影响 Sr 和 Ca 的相对浓度,因为 Sr 的离子电位比 Ca 小,所以易为粘土所吸附。图 9 中显示纵向上演化有逐渐减小的趋势。

c) Fe/Mn 值

该比值常称为近岸指数。由于铁与氧的亲合力高于锰和氧的亲合力,Fe 易于氧化形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 而发生沉淀,因此,Mn 的氧化物比铁的氧化物有更大的稳定性和迁移力,锰还可以形成可溶的重碳酸盐,增加锰在溶液中的稳定性。图 9 显示红色岩层具有较高的比值,说明湖水变浅有利于铁的富集,不利于 Mn 富集,灰色岩层具有较低的比值,跟红色岩层具有相反的特征;

d) V/Ni 比

该比值几乎跟 Fe/Mn 比具有相似的演化规律,钒与镍的地球化学行为较相近,V 和 Ni 趋向于富集在含硫化物的沉积岩中,但它们的聚集系数却不相同。通常情况下,V/Ni 值大于 1 为还原环境,而小于 1 为氧化环境。如果盐岩沉积时,盐湖为还原环境,其 V/Ni 值应大于 1,反之应小于 1。图中显示该地区 V/Ni 比均大于 1,但是明显灰色地层比值更高,红色地层比值更低,说明灰色地层的还原性比红色地层要高。该比值呈现出的特征总体大于 1,还可能跟成岩过程中岩浆和成岩流体的物质交换有关。

5 旋回沉积物质耦合关系

通过对研究区孔店组旋回现象、矿物、元素特征进行详细分析,建立了旋回沉积宏观和微观物质耦合关系,研究结果证实了不同尺度的沉积旋回对宏观和微观的物质构成具有一定的控制作用,沉积水介质条件和气候对物质的构成具有一定的控制作用,导致了有些元素的富集,甚至形成某些沉积矿产,如干旱环境,湖水浓缩容易富集岩盐和石膏,特殊的沉积水介质容易富集某种重要的稀有元素。这一点在现代沉积和矿产开发中得到了很多的证实。然而,探讨沉积旋回的宏观和微观的物质构成和富集情况,并非是简单的对应关系。文中部分矿物和元素也并非那么有规律可循,原因在于自然界中沉积物到沉积岩再到后期演化的过程是非常复杂的。通过以上现象的认识,笔者认为有 3 个问题值得注意。

1) 沉积旋回与矿物的耦合关系

沉积旋回现象一般表现为粒度、岩性、颜色等的旋回变化,形成原因主要与原始沉积期的水动力、物质来

源、气候、水介质条件等因素有关系。对于海相碳酸盐旋回沉积非常普遍,且矿物成分相对单纯。而对于陆相湖泊环境的沉积旋回物质成分复杂,矿物成分与宏观表现的耦合关系是否那么完美? 碎屑岩中常见矿物有石英、长石、碳酸盐、粘土矿物、石膏等。这些矿物类型除石英相对较稳定之外,其他几种均容易发生溶解和迁移。前文建立的旋回地层与矿物的关系显示了一定的规律性,主要是基于颜色旋回的变化引起的矿物成分的差异进行的分析。尽管矿物在成岩过程中发生了一些改变,但是该结果仍具有一定的规律性,如石英的含量与引起旋回的湖盆水体下降和上涨有一定的联系,长石含量变化,特别是在常温条件下容易溶解的斜长石的含量,也与引起旋回的水体变化有一定联系。粘土矿物的总量的变化虽然不具有明显变化,但是通过具体成分的变化也能具有一定的变化规律。特别是石膏沉积的变化,比较能代表湖盆水体的水介质条件,因此与旋回变化耦合关系也比较好。总体上讲,宏观的旋回沉积到微观的矿物耦合关系比较好。

2) 矿物富集规律与元素富集的耦合关系

碎屑岩中的矿物构成决定了主要元素的含量,石英、钾长石、斜长石、蒙脱石、高岭石、伊利石、绿泥石、方解石、白云石、硬石膏(CaSO_4)等,矿物的存在,决定了岩石的元素富集。前文所述元素富集中,常量元素 Al, Ca, Fe 比较有规律出现,微量元素中 Zn, Co, Ga, Sr, Ba 具有一定规律。结合矿物的演化规律和元素演化规律来看,Al 的含量随着长石变化有规律的变化;Ca 的来源主要为斜长石、方解石和硬石膏,从演化关系的耦合来看,有比较好的耦合关系,局部存在异常现象主要是由于萤石的存在引起了 Ca 的异常;Fe 的来源有多种,绿泥石、黄铁矿为主要来源,红色地层中铁的含量升高,导致铁与这两种矿物的耦合关系并不是很好;微量元素比较复杂,Sr 含量和 Ba 含量均与旋回地层有较好的耦合关系,提供该类元素主要为重晶石和天青石。研究表明,胶结物中存在这两种元素。总之微量元素自身对环境具有耦合关系,由于含量较少,镜下很难将矿物载体鉴定出来,但是微量元素对环境和沉积旋回比较敏感,特别是微量元素比值有很好的耦合关系。

3) 旋回沉积-矿物-元素耦合关系

在此耦合关系中,需要考虑成岩流体的改造作用。尽管沉积环境控制下的旋回沉积发生之后主要元素并不会发生太大改变,但成岩过程中的流体改造可能会起到很重要的作用,成岩系统的开放与封闭对原始沉积矿物和元素有不同的影响(图 10)。原始沉积矿物有时会在成岩过程中消失殆尽。如长石,虽然本文涉及到的长石含量比较高,但对某些地层来讲,特别是经历

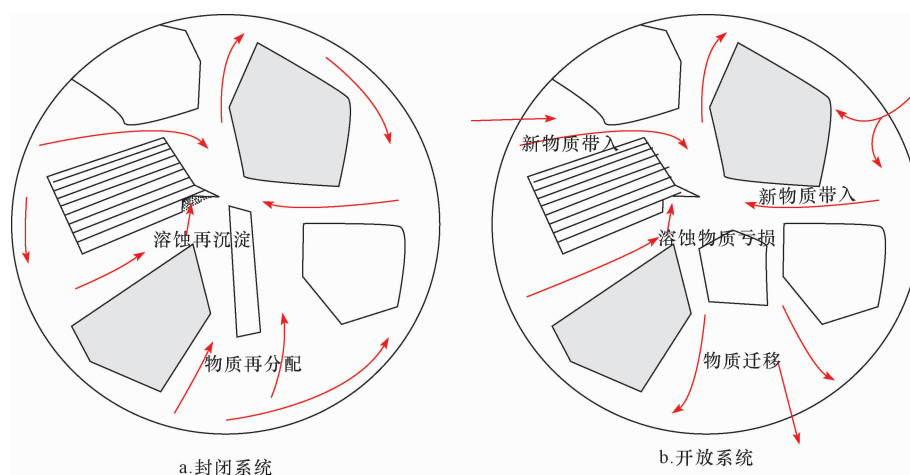


图10 不同成岩系统物质分配示意图

Fig. 10 Schematic diagram showing material distribution in different diagenetic systems

了很长的地质时期,并且多期次成岩改造作用之后,长石或许被全部被溶解带走或者是转变成粘土矿物。开放成岩系统中,由于物质的迁移,会有新矿物的生成和部分矿物的溶解,封闭成岩系统中,由于流体的循环,导致部分元素重新组合,粘土矿物的转化是最好的解释,对于粘土矿物来讲,成岩改造之后就更难恢复与旋回的物质耦合关系。因此,对于原始沉积的矿物来说,无论是封闭环境还是开放环境,成岩改造的作用对旋回与矿物的耦合关系都是非常不利的。元素特征的情况更加复杂,如果是封闭成岩环境,沉积旋回地质体没有与外界物质交换,这种情况下,元素特征保留了原始的沉积信息,元素的聚集对于分析沉积环境和矿产资源开发都是非常有利的。如果地质体处于开放环境中,或者是某个时间段经历了开放环境,如构造活动和岩浆活动。这种情况下元素聚集特征与旋回分析耦合关系就非常差,前文所述元素特征中某些元素比较杂乱,无任何规律,可能就跟外来物质的加入有关。开放环境中,由于物质交换,可能还会富集之前沉积没有的元素和矿物,如 W111 井的底部沉积时期,就出现了火山物质,说明当时有岩浆作用,对沉积物进行了改造,因此在 W111、W113 等井位中出现了萤石、天青石、黄铁矿、硅质胶结等物质,这种物质的出现提供了 Sr、Ca 等元素,可能会对元素分析造成很大影响。因此,在进行元素富集规律分析的时候必须要考虑到该因素的影响。

6 结论

1) 王家岗地区孔店组具有旋回特征,主要表现为颜色的旋回性和岩性的旋回。颜色旋回表现为红色—灰色的各个尺度的旋回变化,主要由气候条件和沉积水介质引起;岩性旋回主要为砂岩—泥岩的旋回变化和砂岩粒度的旋回变化,主要由物质来源和水动力条

件引起。旋回沉积机理主要为间歇性盐湖的振荡作用所致。红色岩层代表湖盆水体收缩,间歇干旱环境;灰色岩层代表湖盆水体整体上涨,间歇性潮湿的沉积环境。纵向演化上,孔店组为一个湖平面逐渐收缩的演化过程,期间包括许多高频的次级升降旋回。

2) 颜色旋回变化过程中,存在一定规律的矿物聚集响应特征。纵向演化上,石英含量逐渐逐渐增加,钾长石含量逐渐增加,斜长石逐渐减少,方解石含量有所减少,硬石膏含量逐渐增加等变化,矿物变化旋回与颜色旋回的变化具有较好的耦合关系。部分矿物含量不稳定可能是由于后期成岩流体的改造作用。

3) 旋回变化与元素富集也具有一定的耦合关系,纵向演化上,常量元素中 Al、Ca、Fe、Mg 含量有增加的趋势。微量元素中 Sr、Ba、Ga、Co 4 种元素含量有增加的趋势。旋回变化与元素比值也有较好的耦合关系,特别是 Fe/Mn 和 V/Ni 比值,呈现出多级次旋回变化的特征。

4) 沉积介质和气候条件控制了旋回沉积的变化,进而控制了矿物组成特征和元素富集的变化。旋回变化与矿物和元素富集均有一定的耦合关系。这种耦合关系主要表现在部分矿物和元素上,这也是沉积学常提到的“指相矿物”,对于大多数元素而言,这种耦合关系并非那么简单,必须考虑到流体—岩石的相互作用、成岩演化系统的封闭性。恢复原始沉积矿物,才能更好的研究旋回沉积中的沉积机理和物质耦合关系。

致谢:感谢胜利油田研究院测试中心提供了部分测试数据。

参考文献

- [1] Wonsuck Kim, Chris Paola. Long-period cyclic sedimentation with constant tectonic forcing in an experimental relay ramp[J]. *Geology*, 2007, 35(4): 331–334.
- [2] O'Brien N R, Meyer H W, Reilly K, et al. Microbial taphonomic

- processes in the fossilization of insects and plants in the late Eocene Florissant Formation, Colorado[J]. Rocky Mountain Geology, 2002, 37(1): 1–11.
- [3] Humphrey N F, Heller P L. Natural oscillations in coupled geomorphic systems; an alternative origin for cyclic sedimentation[J]. Geology, 1995, 23(6): 499–502.
- [4] Gurel A, Kadir S. Palaeoenvironmental approach to the geology, mineralogy and geochemistry of an Early Miocene alluvial-fan to cyclic shallow-lacustrine depositional system[J]. Clay Minerals, 2010, 45: 51–75.
- [5] Hinnov L A, Ogg J G. Cyclostratigraphy and the astronomical time scale[J]. Stratigraphy, 2007, 4: 239–251.
- [6] Kuiper K F, Deino A, Hilgen F J, et al. Synchronizing rock clocks of Earth history[J]. Science, 2008, 320: 500–504.
- [7] 龚一鸣, 杜远生, 童金南, 等. 旋回地层学: 地层学解读时间的第三里程碑[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2008, 33(4): 443–457.
- Gong Yiming, Du Yuansheng, Tong Jinnan, et al. Cyclostratigraphy: the third milestone of stratigraphy in understanding time[J]. Earth Science-Journal of China University of Geoscience, 2008, 33(4): 443–457.
- [8] 孟祥化, 葛铭. 中朝板块层序事件演化[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Meng Xianghua, Ge Ming. Sequence of the Sino-Korean plate event evolution[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [9] 梅冥相. 碳酸盐岩米级旋回层序的成因类型及识别标志[J]. 岩相古地理, 1993, 33(6): 34–45.
- Mei Minxiang. Genetic types and identification marks of meter-scale cyclic sequences of carbonate[J]. Lithofacies Palaeogeography, 1993, 33(6): 34–45.
- [10] Gurel A, Kadir S. Palaeoenvironmental approach to the geology, mineralogy and geochemistry of an Early Miocene alluvial-fan to cyclic shallow-lacustrine depositional system[J]. Clay Minerals, 2010, 45: 51–75.
- [11] 吴智勇, 姜衍文. 全球旋回地层学述评[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(1): 15–21.
- Wu Zhiyong, Jiang Yanwen. Comments on global cyclostratigraphy[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(1): 15–21.
- [12] 梅冥相. 碳酸盐台地的层序地层格架及旋回地层级次[J]. 岩相古地理, 1992, 30(2): 44–50.
- Mei Minxiang. Sequence stratigraphic framework and cycle ground level times of Carbonate platform[J]. Lithofacies Palaeogeography, 1992, 30(2): 44–50.
- [13] 梅冥相. 苏巷层硅酸盐成因复合海平面变化旋回层序[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 15(2): 145–153.
- Mei Minxiang. Differentiation cause composite sea level changes cyclic sequence of Portland of Suxiangcheng[J]. Guilin Metallurgical Geological Institute, 1994, 15(2): 145–153.
- [14] Johnson C L, Graham S A. Cycles in periallacustrine facies of Late Mesozoic rift basins, Southeastern Mongolia[J]. Journal of Sedimentary Research, 2004, 74(6): 786–804.
- [15] Gurel A, Kadir S. Palaeoenvironmental approach to the geology, mineralogy and geochemistry of an Early Miocene alluvial-fan to cyclic shallow-lacustrine depositional system[J]. Clay Minerals, 2010, 45: 51–75.
- [16] 远光辉, 操应长, 王艳忠. 东营凹陷民丰地区沙河街组四段—三段中亚段沉积相与沉积演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 277–286.
- Yuan Guanghui, Cao Yingchang, Wang Yanzhong. Sedimentary facies and their evolution of the 4th-middle 3rd members of Shahejie Formation in Minfeng area, Dongying Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 277–286.
- [17] 李文浩, 张枝焕, 晁灵, 等. 渤南洼陷北部陡坡带沙河街组砂砾岩有效储层物性下限及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 766–777.
- Li Wenhao, Zhang Zhihuan, Zan Ling, et al. Lower limits of physical properties and their controlling factors of effective coarse-grained clastic reservoirs in the Shahejie Formation on northern steep slope of Bonan subsag, the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 766–777.
- [18] 吴智平, 李伟, 任拥军, 等. 济阳坳陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 280–285.
- Wu Zhiping, Li Wei, Reng Yongjun, et al. Basin evolution in the Mesozoic and superposition of Cenozoic basin in the area of the Jiyang depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 280–285.
- [19] 操应长, 王建, 高永进, 等. 济阳坳陷东营凹陷古近系红层——膏盐层沉积特征及模式[J]. 古地理学报, 2011, 13(4): 375–386.
- Cao Yingchang, Wang Jian, Gao Yongjin, et al. Sedimentary characteristics and model of red beds—gypsum salt beds of the Paleogene in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 375–386.
- [20] 谭先锋, 田景春, 李祖兵, 等. 碱性沉积环境下碎屑岩的成岩演化[J]. 地质通报, 2010, 4(20): 6–14.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing, et al. The diagenetic evolution clastic alkaline depositional environment[J]. Geological Bulletin, 2010, 4(20): 6–14.
- [21] 谭先锋, 田景春, 李祖兵, 等. 东营凹陷古近系孔店组成岩特征及对储层的控制[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(6): 27–32.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing, et al. Diagenetic character and controlling factor of reservoir of Kongdian Formation of Paleogene in Dongying basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(6): 27–32.
- [22] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 498–506.
- Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis[J]. Geochimica, 2009, 38(5): 498–506.
- [23] 刘志飞, 赵玉龙, 李建如, 等. 南海西部越南岸外晚第四纪粘土矿物记录: 物源分析与东亚季风演化[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(9): 1176–1184.
- Liu Zhifei, Zhao Yulong, Li Jianru, et al. Late Quaternary clay mineral record in the western south China Sea coast of Vietnam: source analysis and East Asian monsoon evolution[J]. Science in China(D Series), 2007, 37(9): 1176–1184.
- [24] 应凤祥, 罗平, 何东博. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo. Diagenesis and diagenetic numerical simulation of clastic reservoir of petroliferous basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [25] 谭先锋, 田景春, 林小兵, 等. 陆相断陷盆地深部碎屑岩成岩演化及控制因素: 以东营断陷盆地古近系孔店组为例[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 934–944.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. Diagenetic evolution and controlling factors of deep-seated clastic rocks in terrestrial fault-depressed Basin[J]. Geoscience, 2010, 24(5): 934–944.