

一个湖泊-三角洲沉积总体中泥质岩成因地层研究的元素统计分析

邬金华 余素玉

(中国地质大学, 武汉 430074)

提 要 将元素地球化学行为的一般规律与 R 因子分析、Q 聚类分析和 Q 因子分析以及其它地质特征结合起来揭示出大庆油田东部外围中白垩统泉头组第三段和第四段湖泊-三角洲(水下部分)沉积总体泥质岩中各元素丰度及其比率受到盆体性因子(还原度 F_1 、酸度 F_2)和盆围性因子(母岩 F_3 和胶体输入量 F_4)的控制,最突出的表现是: Sr/Ca 与还原度和酸度正相关, CaO/MgO 与酸度负相关, Ni/Co(或 Ni、Cr)与还原度负相关, Ti/V 与偏基性母岩影响强度负相关, Sr/Ba 与胶体输入量负相关。这些泥质岩可分成四类,与其中所夹粉砂岩(扩散流成因单位)一起分别构成水下河道周缘细屑沉积组合、滨浅湖沉积组合、前三角洲沉积组合和较深湖沉积组合,其沉积水深依次增加,氧化性和碱性依次减弱。偏基性母岩影响在水下河道周缘和前三角洲一带相对较强,在较深湖,因有导源于三角洲前缘的重力流发生,这种影响也时有表现。胶体输入量在所有沉积组合之间无特别明显的差异。

关键词 湖泊-三角洲 泥质岩 元素因子分析

第一作者简介 邬金华 男 52 岁 副教授 沉积岩和盆地分析专业

成因地层研究的核心是“成因”^[1],而陆相沉积多带很强的地方色彩,其中泥质沉积的成因研究比砂岩更为困难,简单使用元素丰度或丰度比值作不同沉积盆地的对比常常难以奏效。我们通过钻井岩芯识别大庆油田东部外围中白垩统泉头组第三段和第四段湖泊-三角洲(水下部分)沉积总体时,将泥质岩部分常微量元素的一般地球化学特征与统计分析结合起来,揭示了各元素丰度的地区性控制因素,给出了沉积水化学条件的判别指标,为正确划分较低级成因地层单位提供了依据。

1 地层和泥质岩一般特征

目的层段整体为砂(或粉砂)泥互层状。顶部与青山口组深湖相泥岩整合过渡^[2]。砂(或粉砂)岩中常见一般交错层理、平行层理、脉状层理、浪成交错层理、块状层理,偶而有反 S 型交错层理。完整双壳化石时有所见。虫孔构造普遍发育。重力流型泥砾和钙砾(泥晶方解石质内碎屑)更是屡见不鲜。普遍含少量淡绿—深绿色海绿石。通过重砂、岩屑和古构造隆起等研究,其蚀源区不超过 300 km,母岩以中酸性、中基性岩浆岩和低级变质岩为主。

泥质岩在地层中约占一半左右。宏观基本为两种颜色,其一为偏紫(紫红、暗紫或灰紫),其二为灰绿。偶而为深灰—黑色并有中等程度页理。层理构造包括水平层理、透镜状层理、

小型沙波层理和块状层理等。动物化石少见,除常有可疑的微体生物(介形虫?)外,只在少数井位少数层位的灰绿色泥岩中发现有完整双壳化石,在深灰—黑色页岩中发现有完整双壳、鱼鳞和较多叶肢介化石。部分紫色和灰绿色泥岩含钙。带紫色的泥岩常含钙质团块,其色白、粉白或浅褐,外形以云团状为主,大小多在1—3 cm之间,边界与围岩层理协调一致,偶而呈碎块状或虫孔充填状,内部为泥晶方解石质。少数井位泉三段中部偶含少量分散细小团块状硬石膏。泉四段灰绿色泥岩(或泥砾)中常含晶质黄铁矿。钙质团块已被解释成同生期蠕虫或其它无脊椎动物腐烂导致的生物化学作用产物。硬石膏为滨湖区因湖水面短时下降在炎热干旱气候条件下生成石膏再经成岩脱水而成。黄铁矿则是早期成岩又叠加重结晶作用的产物。

电镜下不同颜色泥岩在粘土矿物组成上没有太大差异,均以伊利石为主,其次为绿泥石和可疑的蒙脱石。常见方解石晶体和球状孢子或藻钻孔遗迹。

2 样品和元素分析

泥质岩中元素丰度是多因素的复杂函数。为了相对突出环境对丰度的贡献同时也照顾到时空覆盖范围,这里选用了9口井不含粉砂或粉砂极少的两种基本颜色类型的50块样品和1块黑色页岩样品,其中包括若干含钙质团块、黄铁矿和毗邻硬石膏的样品(碎样前已将它们全部剔除),依据母岩主要常微量元素及其对环境的敏感程度,用等离子发光光谱法对11种元素作了分析。考虑到元素的分异和重新组合,又计算了7种元素丰度的比率值。

3 R因子分析

泥质岩现有元素丰度基本上可看成是沉积物化条件的反映,R因子分析中各因子实际就是这些条件的分解结果(图1)。如暂不考虑元素丰度比率值,图1中各元素丰度实际均受两个以上因子的交叉影响。但去精取粗,仍可将前四个主要因子理解为: F_1 是还原度因子, F_2 是酸度因子, F_3 是基性母岩影响强度因子, F_4 则可能是与胶体输入量有关的因子。主要理由是:

(1)Fe、Mn、Ni、Co、Cr等均属过渡性元素,其溶解沉淀主要受控于氧化还原电位又多与 F_1 呈强或较强负相关。Mn在 F_1 中负荷很小可能是由于在pH值大致低于9的条件下, Mn^{2+} 稳定区的Eh值范围很宽而对Eh值不敏感的缘故(图2)。另外,在还原条件下,它主要受 CO_3^{2-} 的控制,其稳定区与 $CaCO_3$ 很接近,都偏向高pH值区⁽³⁾,所以还与 F_2 呈强负相关。

(2)Ca、Sr、Mg等为碱性元素,其迁移能力主要受控于酸碱度且与 F_2 负相关。Mg的表现较为特殊,它在 F_2 中负荷低,在 F_1 中负荷高,这暗示它在此处主要是以类质同象形式赋存在硅酸盐中。在氧化条件下,当铁从铁镁共存矿物相中溶解迁移的同时,矿物晶格即遭到破坏,Mg必然也随之丢失。这可能是Mg与 F_1 强负相关的主要原因。Ca与Mg多少有点类似,但在硅酸盐中,它与铁的关系远不及镁那么密切,因而虽与 F_1 也负相关,但负荷较小。

(3)Mg、Ni、Cr、Co、V、Ti等在偏基性母岩中最富集(表1),当汇水盆地的陆屑供应具区域性特点、搬运沉积又较快的情况下,这些元素的丰度也是这类母岩影响强度的体现且

与 F_3 正相关。这种影响可能主要是通过呈细屑状的暗色组分实现的;共生砂岩(包括部分粉砂岩)中常见玄武岩、安山岩岩屑(含量一般 4%—9%)说明这种暗色组分的影响是普遍存在的。 Fe 是个例外,它在偏基性母岩中也很富集却与 F_3 负相关,尽管负荷很小,推测这是由于在研究区的具体背景下,这类母岩影响愈强,其它基性元素(如 Mg)含量增高较 Fe 更快,反而使 Fe 相对有所降低的缘故。

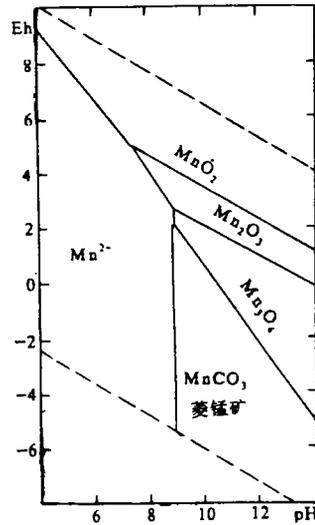
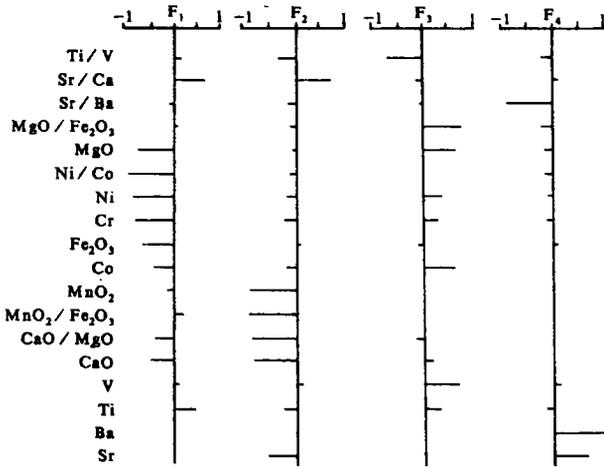


图 1 R 正交旋转因子图解

图 2 锰氧化物和碳酸盐 Eh—pH 相图

$t=25^{\circ}C$ (引自赵伦山等,1987,地球化学第 234 页)

Fig. 1 Diagram of R-mode orthogonal rotation factors

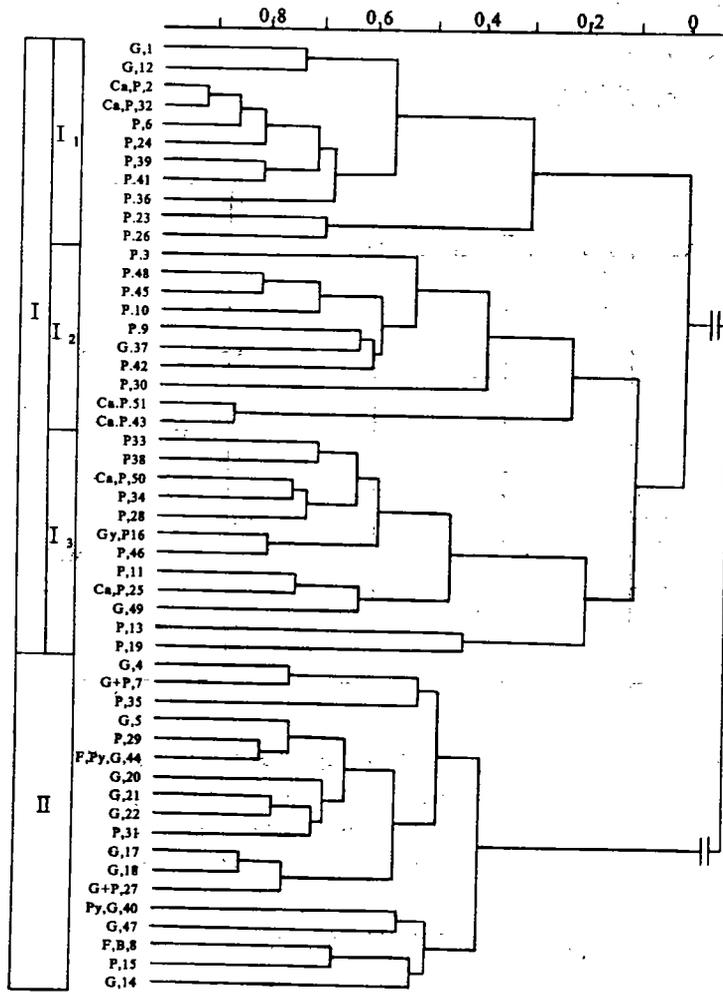
Fig. 2 Manganese oxide and carbonate phase diagram with Eh—pH, $t=25^{\circ}C$ (After Zhao Lunshan *et al*, 1987, Geochemistry, p234)

表 1 主要岩浆岩和沉积岩中部分元素平均丰度^[3]

Table 1 Average abundances of elements in major magma rocks and sedimentary rocks

	%				$\times 10^{-6}$					
	Fe	Mg	Ca	Ti	V	Co	Cr	Ni	Ba	Sr
超基性岩	9.43	20.40	2.50	0.03	40	150	1600	2000	0.4	1
玄武岩	8.65	4.60	7.60	1.38	250	48	170	130	330	465
闪长岩	5.85	2.18	4.65	0.80	100	10	50	55	650	800
花岗岩	2.70	0.56	1.58	0.23	0	5	25	8	830	300
粘土	6.50	2.10	2.90	0.46	120	74	90	225	2300	180
页岩	4.72	1.50	2.21	0.46	130	19	90	68	580	300
砂岩	0.98	0.70	3.91	0.15	20	0.3	35	2	0	20
碳酸盐岩	0.38	4.70	30.23	0.04	20	0.1	11	20	10	610

转引自赵伦山等,1987,地球化学,第 40—43 页。



数字1—51为样品编号 G. 带紫色 P. 灰绿色 G+P. 斑杂色 B. 黑色

Ca. 含钙质团块 Gy. 毗邻硬石膏 Py. 含黄铁矿 F. 含双壳化石

图3 泥质岩Q聚类谱系

Fig. 3 Q-mode cluster branch of mudstones

(4)Ba 也是碱性元素,但它只受 F₄ 支配,与其它碱性元素迥然不同。在自然界的几种主要沉积物中,它在粘土和页岩中的丰度超过它在碳酸盐岩中丰度的几十乃至二百多倍是不同寻常的。已经知道,硫酸根和磷酸根是 Ba 的强沉淀剂,但平均而言,它们的数量在粘土(泥质)和碳酸盐沉积环境中即使有差别也不应该如此悬殊。因而这种富集不大可能是这类强沉淀剂造成的。实际上,粘土常是胶体性沉积,而碳酸盐则是离子性沉积,前者具有很强的吸附作用,不仅 Ba, 还有 Ti、V、Co、Cr、Ni 等等在粘土沉积中也都高于或大大高于碳酸盐岩(表 1),明显暗示了受胶体吸附而富集的特点。这就是推测 F₄ 含义的主要出发点。但在本研

究层段的具体情况下, Ti、Cr、Ni 以及 Mg、Fe 等却与 F_4 呈极弱的负相关, 其原因可能是 Ba 在这些离子中原子量最大, 受表层吸附最强, 在吸附作用发生的较早阶段曾在一定程度上取代过别种离子(离子交换)。这种粘土或胶体本质上应以外源或它生为主, 因而 Ba 或许还可作为外源粘土的间接判别指标。Sr 也可被粘土或其胶体吸附而较多地出现在泥质沉积中, 但由于它易于占据 Ca 的晶格位置而在 CaCO_3 中富集, 因而除与 F_4 正相关外, 还与 F_2 负相关。

元素丰度比率反映的是两种元素丰度的相对变化, 是多种因素影响的总体效应, 但它们在各自因子中的负荷大小却显示了它们的主控因子。例如图 1 中 Sr 受 F_2 和 F_4 控制, Ca 受 F_1 、 F_2 控制, 而 Sr/Ca 的主控因子则是 F_1 和 F_2 , 因而主要与还原度和酸度正相关。同样, Ti/V 和 $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 分别与偏基性母岩影响强度负或正相关(后者证明在这种影响增强时, Mg 增加要快于 Fe)。Sr/Ba 主要与胶体量负相关。Ni/Co 主要与还原度负相关。 $\text{MnO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 CaO/MgO 主要与酸度负相关。

过去, Sr/Ba 曾被用来判别盐度, 但 Sr 和 Ba 的溶解沉淀与盐度并无直接关系。本区泉四段(紧邻青山口组深湖相)沉积在较深湖的 4 块泥岩样品 Sr/Ba 在 0.48—1.16 之间, 平均 1.09, 1 块黑色页岩样品 Sr/Ba = 1.04, 而毗邻硬石膏的样品 Sr/Ba 仅 0.96。用盐度变化是很难对此作用解释的。可见 Sr/Ba 没有普遍的盐度判别价值, 尤其在内陆湖盆内不宜采用。

由于 F_1 和 F_2 体现了汇水盆地自身的介质特性, 这里总称为盆地(或盆内)性因子, F_3 和 F_4 则是外部条件的反映, 可称为盆围(或盆外)性因子。

4 Q 聚类和 Q 因子分析及元素相关图解

Q 聚类结果(图 3)显示, 全部 51 块样品在相似系数为 0.2—0.4 范围内聚成了四类, 前三类又合成了一大类, 这里分别用 I 类(= $I_1 + I_2 + I_3$)和 II 类表示。其中, I 类几乎囊括了所有带紫色和含钙质团块的样品, II 类则主要由灰绿色样品构成, 黑色页岩、含黄铁矿和双壳化石的岩样也在其中。可见, 这是一个环

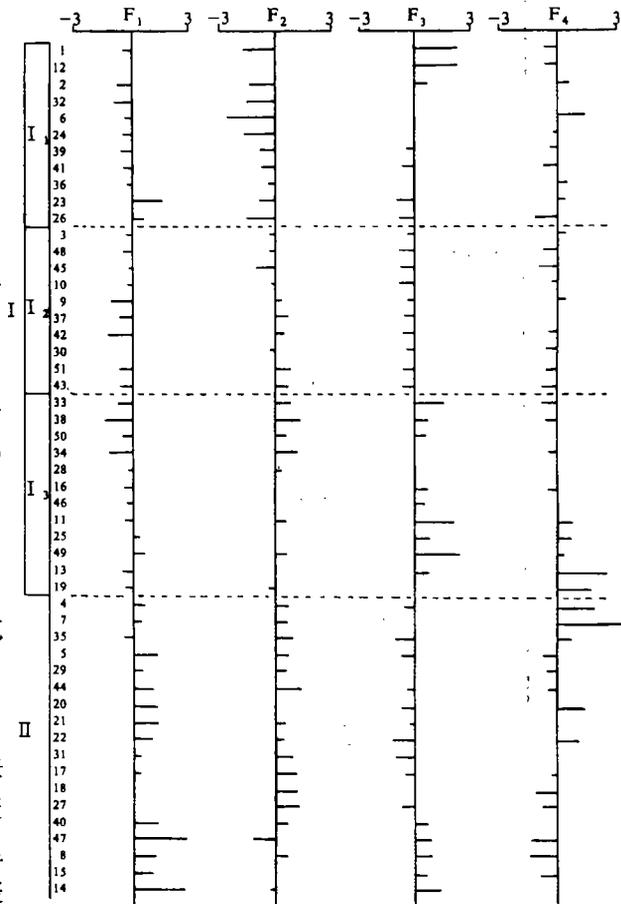


图 4 泥质岩 Q 因子得分图解
Fig. 4 Diagram of Q-mode factor scores for mudstones

境色彩很浓的聚类。将样品按此聚类顺序排列的 Q 因子分析结果(图 4)显示, F_1 因子与 I 类负相关, 与 II 类正相关; F_2 与 I_1 类负相关, 与 I_3 和 II 类基本正相关, 与 I_2 类相关性不一; F_3 与 I_2 类负相关, 与 I_3 类正相关, 与 I_1 和 II 类相关性不一; 而 F_4 与所有类别的相关性都不一致。按 R 因子分析结论, 运用表征这些因子的元素丰度或丰度比率作相关图可将这一聚类的内在原因清楚地反映出来, 但比较而言, 用丰度比率作图效果更好。这里介绍几个有典型意义的相关图。

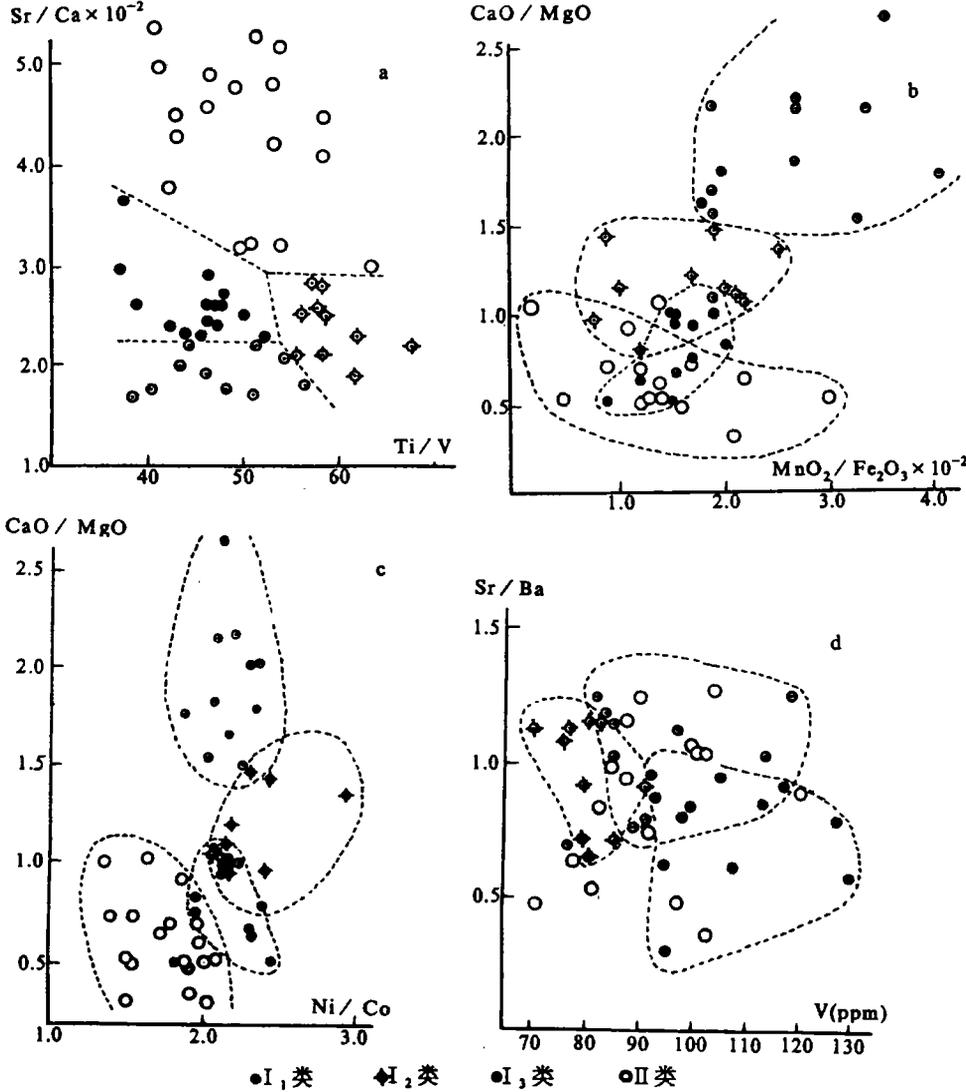


图 5 各类泥质岩元素相关图

Fig. 5 Element correlogram of various mudstones

Sr/Ca—Ti/V 相关图(图 5a)这是唯一能将绝大多数样品按 Q 聚类结果区分开来的相关图。实际上, 起着更关键作用的是 Sr/Ca。I 类样品的 Sr/Ca < 1.95 × 10⁻², II 类样品 Sr/Ca > 1.95 × 10⁻²。这说明相对后者而言, 前者沉积在更氧化和更碱性的条件下。依 Ti/V 值,

在 I 类之内, I₂ 类受偏基性母岩影响弱于 I₁ 和 I₃ 类, 表现为前者 Ti/V > 56, 后者 Ti/V < 56。I 类 Ti/V 全部落在 I 类之内, 因而这种影响有强有弱。

CaO/MgO—MnO₂/Fe₂O₃ 相关图(图 5b), 从区分样品类别效果看, CaO/MgO 仅次于 Sr/Ca, 但两个比值依 I₁、I₂、I₃ 和 II 类顺序都明显下降, 这说明沉积碱度最强的是 I₁ 类(CaO/MgO > 1.5), 其次是 I₂ 类(CaO/MgO = 0.94—1.5), 最弱的是 II 类(CaO/MgO < 0.94), I₃ 类则介于 I₂ 和 II 类之间。各类 MnO₂/Fe₂O₃ 没有截然界线, 可见作为环境酸碱度判别指标, CaO/MgO 要比 MnO₂/Fe₂O₃ 更敏感。

CaO/MgO—Ni/Co 相关图(图 5c), 从图中可以看出, II 类样品 Ni/Co < 2.1, I 类 Ni/Co > 2.1, I₁、I₂、I₃ 类之间没有差别, 这说明 II 类样品形成条件相对还原, I 类则相对氧化。这与前者主要为灰绿色、后者主要带紫色的总体现象是吻合的。用 Ni、Cr 等代替 Ni/Co 也可得到相似结果。前已述及, I 类样品中有些为紫红色, 有些为暗紫或灰紫色。这种差别似乎反映了氧化性强弱的不等, 但从 Ni/Co 等特征值上却看不出这种规律。有些紫红色样品的 Ni/Co(或 Ni、Cr) 甚至大大低于暗紫或灰紫色的样品。因而在“带紫色”大范围内的颜色微妙变化可能并不是氧化性的强弱造成的, 或许与其中所含绿色、褐色的 Mn₃O₄、MnOOH、MnO₂、Fe(OH)₂ 等与酸碱度有关的成分波动有关^[4]。

表 2 泥质岩元素丰度的环境意义

Table 2 Environmental significance of element abundances in mudstones

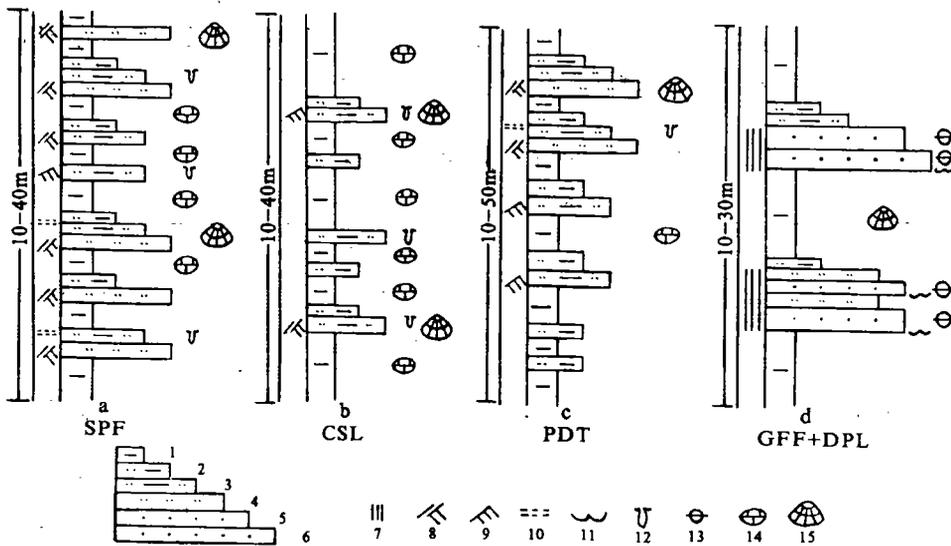
Q 因子		盆体性因子				盆围性因子		沉积条件			
		F ₁ , F ₂	F ₁			F ₂	F ₃			F ₄	
条件意义		与还原度和酸度正相关	与还原度负相关			与酸度负相关	与暗色细屑量负相关	与胶体量正或负相关			
衡量元素		Sr/Ca × 10 ⁻²	Ni	Cr	Ni/Co	CaO/MgO	Ti/V	Sr, Ba Sr/Ba	水化学条件 基性母岩影响强度		
Q 聚类	I	I ₁	<1.45	>30	>60	>2.1	>1.5	<56	无明显规律	强氧化碱性	较强
		I ₂	<1.95				0.94—1.5	>56		氧化偏碱性	较弱
		I ₃	1.45—1.95				0.5—1.1	<56		氧化碱-偏碱	较强
	II	>1.95	<30	<60	<2.1	<0.94	38—64	弱氧化弱碱性		有强有弱	

Sr/Ba—V 相关图(图 5d), 图中显示, 在 I 类之内, V 丰度较高的是 I₁ 和 I₃ 类, 较低的是 I₂ 类, II 类(图中未圈出)则完全重叠在 I 类范围之内。这种分布的寓意与 Ti/V 比的分析结论相同, 即受偏基性母岩影响较强的是 I₁ 和 I₃ 类, 较弱的是 I₂ 类, 而 II 类则强弱不等。用 Co 代替 V 后结果与此类似。Sr/Ba(以及 Sr 或 Ba)与 Q 聚类几乎没有关系, I 类和 II 类全部叠合。虽然在 I 类之内, I₁ 和 I₂ 类的 Sr/Ca 大体上有高于 I₃ 类的趋势, 但重叠也

很厉害。这说明所有样品的胶体输入量并无特别明显的差异。

5 沉积条件和成因地层单位划分

因子分析及其相关图解揭示的只是不同类别样品沉积时的相对条件,综合考虑岩石其它特征多少可使这些条件具体化。在Q聚类特征中已经提到,绝大多数含钙质团块和毗邻硬石膏的岩样均为I类,而它们均要求较强的碱性介质(但据Mn在F₁中很小的负荷看,其pH值可能不超过9,参看图2),因而可将I类岩样沉积条件大致视为碱性(不仅是相对碱性)。类似地,含双壳化石的岩样均为II类,说明II类沉积时并不缺氧,因而不可能是绝对还原条件(只是相对还原)。有了这样的限定,再参照颜色和判别指标就可得到较为具体的水化学条件。在盆围性因子中,偏基性母岩影响强度在环境识别中也有重要意义。假定目的层



1. 泥岩 2. 粉砂质泥岩 3. 泥质粉砂岩 4. 粉砂岩 5. 细砂岩 6. 中砂岩
7. 块状层理 8. 交错层理 9. 小型砂波层理 10. 水平层理 11. 冲刷构造,
12. 虫孔 13. 泥砾 14. 钙质团块 15. 双壳化石 SPF, CSL, PDT, GFF, DPL 说明见正文

图6 含有泥质岩的几种沉积组合

Fig. 6 Sedimentary associations containing mudstones

段沉积期的母岩岩性没有大的改变,那么,在湖泊-三角洲(水下部分)体系内,这种影响应该在沉积速率较快的时间和地点较为强烈。作为胶体输入量指标的Sr、Ba或其比率虽然对样品聚类没有太大意义,但这正好说明各类泥岩沉积时具有共同水体(水下),沉积地距河口已有一定距离。以上结果一并列表2中。从此表可以看出,依I₁、I₂、I₃、II类的顺序,沉积水化学条件从强氧化和碱性过渡到弱氧化和弱碱性。按一般湖泊水体氧化性随深度增加而降低的规律,这一聚类顺序也间接反映了沉积水深的增加。有意思的是,随着水体加深,碱性

却降低。推测这很可能与低等藻类进行光合作用消耗 CO_2 使 pH 值上升有关。水体愈深光线愈暗,光合作用愈弱,pH 值上升自然也愈小。

基于以上认识,我们认为,在相对浅水区的 I 类泥岩中, I_1 类可能主要沉积在水下河道周缘一带,是从水下河道漫溢出的水流(较高能扩散流)在能量衰减以后的悬浮沉积产物。这里受母岩成分的影响相对较强,由于水体较浅,藻类植物繁盛,因而氧化性和 pH 值均较高。这部分泥岩与粉砂质扩散流成因单位一起构成水下河道周缘细屑沉积组合(SPF,图 6a)。 I_2 类泥岩可能为较浅湖泥岩,主要沉积在水下河道影响不及或影响很小的区域,例如是在三角洲横向迁出以后形成的,因而直接受母岩成分的影响相对最弱。这里沉积速率很低,沉积水深大于 I_1 类泥岩,致使氧化性和碱性均低于 I_1 类泥岩。它与极稀疏的低能扩散流成因单位一起构成滨浅湖沉积组合(CSL,图 6b)。 I_3 类泥岩可能主要是前三角洲泥岩,直接受母岩成分影响与 I_1 类相似。这里沉积水体更深,氧化性和碱性进一步减弱,是前三角洲沉积组合(PDT)的重要组成部分(图 6c)。 II 类泥岩为较深湖泥岩,是湖进或三角洲退缩时期的产物,在所有泥岩中沉积水深最大,氧化性和碱性以及母岩成分的直接影响均最弱。但由于存在重力流作用,相对浅水区的沉积可能会被再搬运到这里,因而有时也会显示受母岩影响较强的特点。它们常与含大量漂浮状泥、钙砾的砂质重力流沉积组合(GFF)共生(图 6d)也说明了这一点。

最后要强调的是,上述各类泥质岩沉积条件地球化学判别指标的数量界线只有地区性意义,它受益内和盆外诸多因子的制约,因而详细剖析这些因子并以此作大范围的对比可能是识别内陆不同湖盆或湖盆不同发展阶段个性和共性的有效途径。

在研究过程中,始终得到大庆石油勘探开发研究院的大力协助,在此表示衷心谢意。

收稿日期:1994-4-2

参 考 文 献

- [1] 夏文臣,金友鱼,沉积盆地的成因地层分析,武汉:中国地质大学出版社,1989,6—45。
- [2] 杨万里,高瑞琪,郭庆福,刘跃光,松辽盆地陆相油气生成运移和聚集,哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1985,1—20。
- [3] 赵伦山,张本仁,地球化学,北京:地质出版社,1988,234—235。
- [4] 王璞瑾,刘招君,刘万沫,杜小弟,元素地化—数理统计法在松南陆相盆地分析中的应用,沉积学报,1991,9(3):31—39。

Element Statistical Analysis of Mudstones in a Lacustrine-Deltaic Depositional Package for Studies of Genetic Stratigraphy

Wu Jinhua and Yu Suyu

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract

At the third and fourth members of Quantou Group, Middle Cretaceous in the east of the neighbouring area of the Daqing oilfield, it is revealed that the element abundances and their ratios of mudstones in a lacustrine-deltaic (subaqueous) depositional package are controlled by basin-in factors (reducing F_1 , acidity F_2) and basin-out factors (protolith F_3 , colloid input F_4) while the general geochemical rules of the element behaviours are combined with R-mode factor, Q-mode cluster, Q-mode factor analyses and other geologic features, which are expressed conspicuously in correlations of Sr/Ca positive to reducing and acidity, CaO/MgO negative to acidity, Ni/Co negative to reduction, Ti/V negative to influence of basic protolith, Sr/Ba negative to colloid input. The mode cluster demonstrates that the mudstones are divided into four types, which with intercalated siltstones (spread flow genetic units) construct the subaqueous channel periphery fine sedimentary associations (SPF), coastal-shallow lake sedimentary associations (CSL), prodelta sedimentary associations (PDT) and deeper lake sedimentary associations (DPL) in an increasing depositional depth with water chemistry changing gradually from alkali and strongly oxidative to weakly alkali and oxidative. The basic protolith influences more strongly on the SPF and PDT than on the CSL and sometimes intensely on the DPL because of the gravity flows derived from the delta front. The colloid inputs are of not striking differences among all of the associations.

Key Words: lacustrine-delta mudstone element factor analysis