

试论湖相泥质岩的地球化学二分性

邓宏文

(中国地质大学, 北京 100083)

钱 凯

(石油勘探开发研究院天然气研究所, 河北廊坊 102801)

湖相泥质岩在地球化学上具二级二分性, 即首先二分为低硼低伽马蜡烷泥质岩和高硼高伽马蜡烷泥质岩, 前者可再二分为低钙混合型干酪根泥岩和高钙腐泥型干酪根泥岩; 后者可再二分为高伽马蜡烷奇偶均势泥岩和较高伽马蜡烷偶奇优势泥岩。湖相泥质岩地球化学二分性是其沉积时水介质的物理化学性质和在该环境中生存的生物组合, 以及生物死亡后形成的分散有机质聚集与保存条件的综合反映。

关键词 泥质岩 沉积环境 地球化学参数 二分性

作者简介 邓宏文 女 46岁 教授 沉积学

湖相泥质岩是湖泊生命过程的主要物质体现, 同时也反映了母岩风化、搬运过程的继承性影响。正确深入地认识其性质、特点、成因及其与环境的关系, 对了解盆地的形成、演化及矿产资源, 特别对烃类资源的勘探开发具有重要意义。但是, 由于湖相泥质岩主要由显微和超显微颗粒组成, 是一系列物理、化学及生物化学因素在地质历史过程中综合作用的结果, 深入认识并非易事, 特别是在没有露头 and 大量岩芯, 只有岩屑样品的情况下, 尤为困难。这样, 积极开发泥质岩中蕴藏的地球化学信息便显得至为迫切。因为这些信息正是上述作用过程和环境特征的深入反映。出于这种认识我们将这些年来依据中国中、新生代陆相湖盆地球化学资料得出的认识之一——湖相泥质岩的地球化学二分性介绍出来, 希望通过讨论和大家的共同努力, 使湖相泥质岩地球化学这一领域的研究工作得以深入发展。

一、湖相泥质岩的成因系列与岩相类型

据国内外资料, 特别是根据我们对中国东、西部和渤海湾盆地的直接研究, 湖相泥质岩大体可以分成两个成因系列, 14种端元岩相类型。

湖控泥岩系是以悬浮形式搬运和垂直沉降作用为主要机制形成的泥质岩类。因其沉积过程表现为由粘土颗粒与有机质絮凝作用形成的细粒质点或絮凝物沿湖水水柱进行的缓慢、连续或周期性的垂直加积作用, 因而其沉积和组成特征明显受湖水物理化学性质的控制, 故将其称为湖控泥岩系。对应的端元岩相类型有: 黑页岩、钙片黑页岩、钙质纹层页岩、灰色均匀块状泥岩、灰色水平层理泥岩、灰绿色泥岩、棕褐色泥岩、含钙泥岩、含膏盐泥岩等岩相

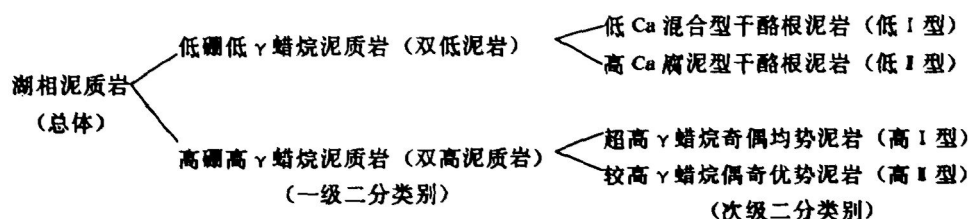
类型。除页岩及含膏盐泥岩外,其他泥质岩常常会含有数量不定的粉砂。

重力流控泥岩系,主要由重力流搬运和沉积作用形成,侧向快速堆积作用显著。与湖控泥岩系不同,受湖水性质影响相对较小,为了区别,将由这种沉积作用形成的泥岩称为重力流控泥岩系。重力流控泥岩系的结构、构造与层序特征体现了其搬运与沉积的控制因素,主要是重力流的浊流和碎屑流。主要岩相类型有:递变纹层粉砂质泥岩相、不均匀块状含粉砂泥岩相、变形泥质岩相及混杂泥岩相等。

对于这两个成因系列主要端元岩相的特点及成因,作者前次已作了详细论证^[1]。这里主要强调的是这已知14种端元岩相及由此推知的过渡岩相,基本上可以较全面地代表湖成泥质岩的岩相类型。因此可以构成讨论其地球化学规律的扎实基础。即有广泛的代表性,又有可能就这些泥质岩的形成条件,探讨其地球化学特征规律性表现的内在原因。

二、湖相泥质岩在地球化学的两级二分性

无论是就无机化学特征而言,还是就有机地球化学特征而论,湖相泥质岩都表现出明显的两级二分现象。这种两级二分现象的程式,以其突出特征可简述如下:



(一) 一级二分性

即湖相泥质岩分为双低泥质岩及双高泥质岩的现象,在无机及有机地球化学上都有明显反映。以渤海湾盆地为例,根据表征沉积水介质条件的地球化学参数,即可将湖相泥岩一分为二(表1),其中,最主要的标志已在分类命名上体现出来。

1. 双低泥质岩

包括灰绿色粉砂质泥岩、水平层理含粉砂泥岩、均匀块状含粉砂泥岩、不均匀块状含粉砂泥岩、递变纹层粉砂质泥岩及钙质纹层泥岩等。

无机地球化学上: B含量 <60 ppm, $B/Ga \leq 4$, 一般小于2; $V/Ni < 10$; 其他元素比值特征是 Sr/Ba 、 Ca/Mg 一般要低, Rb/Ca 、 Fe/Mn 比高。最突出的是 B/Ga 比稳定, 数值较低(图1), 这也是将其表现在分类命名上的原因之一。

有机地球化学上: γ 蜡烷含量 $<2.5\%$, 奇偶优势 $OEP > 1$, 姥/植比多数大于1, 也就是说, 与双高泥质岩相比, 双低泥质岩在有机地球化学上普遍以低 γ 蜡烷, 高 OEP 、高姥/植比为显著特征。其中尤以低 γ 蜡烷最具鲜明的对比性, 因此将其在分类命名上突出地反映出来。

2. 双高泥质岩

双高泥质岩, 包括黑页岩、钙片黑页岩、富钙泥岩、灰色含膏泥岩、含盐泥岩等。

无机地球化学上: 普遍以 B 含量高 (>60 ppm)、 B/Ga 比值高 (>4)、 V/Ni 比值高 (>10), Rb/Ca 、 Fe/Mn 比值低, Sr/Ba 、 Ca/Mg 比值高为特征。

有机地球化学上: 一般以 γ 蜡烷高 ($>2.5\%$), $OEP \leq 1$, 姥/植比值低 (<0.5) 为显著

教1 湖相泥质岩二分性标志与成因

一级二分主要地化参数										次级二分主要地化参数										成因分析			
岩相类型	无机地球化学环境参数				有机地球化学环境参数				无机地球化学环境参数				有机地球化学环境参数				沉积机制	介质相			有机相	沉积相	
	B (ppm)	B/Ga	V/Ni	伽马射线烧%	OEP	糖/植	B (ppm)	Sr/Ba	Ca/Mg	Fe/Mn	Rb/Ca	伽马射线烧%	OEP	糖/植	干酪根类型	C ₂₇ /C ₂₉		奥+羽	S%	Ph			Eh
泥岩类	灰绿、棕褐粉砂岩	低	<60	<4	一般<10	<2.5	>1	>0.5 (多数大于1)		<5	>0.5	>1			I ₁ 型为主，少量I ₂ 型	一般<1	>0.05	垂直向加积作用	<13 (淡水—中盐水)	后氧化相—还原相	藻源-植物源-藻源相	开棚相	
页岩类	块状、条带状粉砂岩、泥岩	低	I ₁ 型																				
均含粉砂层理泥岩	块状、条带状粉砂岩、泥岩	低	I ₁ 型																				
页岩类	钙质纹层页岩	低	I ₁ 型																				
页岩类	黑页岩、钙片页岩	高	I ₁ 型																				
页岩类	富石膏、盐岩	高	I ₁ 型																				

特征。

具体地说,就是(1)伽马蜡烷含量特别高,一般都大于20%,少数小于10%(但大于2.5%),平均22.5%;(2)异戊二烯烷烃组成具有显著的高植烷、低 Pr/nC_{17} 比、高 Ph/nC_{18} ;(3)正烷烃奇偶碳均势与偶碳优势共存。

上述情况说明,两类泥质岩无论在无机地球化学上还是在有机地球化学上都是截然不同的,根据相应的地球化学参数,湖相泥质岩可以很容易一分为二(图1,2)。

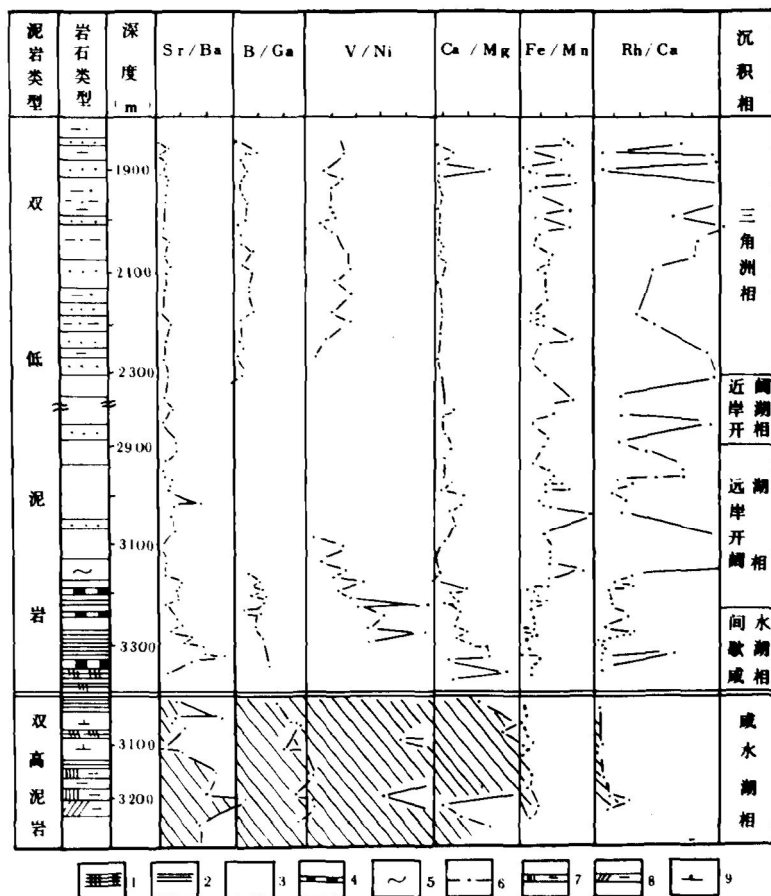


图1 湖相泥质岩元素比值二分性实例(济阳坳陷)

1—黑页岩, 2—钙质纹层页岩, 3—均匀块状泥岩, 4—不均匀块状泥岩, 5—变形泥岩,
6—灰绿色泥岩, 7—含青泥岩, 8—含盐泥岩, 9—钙质泥岩

(二) 次级二分性

进一步研究两类泥质岩的地球化学特征发现, 每类又可一分为二, 而且其地球化学二分性与表征其沉积时物理化学条件的沉积构造相一致, 即: 双低泥质岩中分出低Ca混合型干酪根泥岩(低I型), 主要是不具纹层的泥岩; 高Ca腐泥型干酪根泥岩(低II型), 主要是钙质纹层泥岩。双高泥岩中分出高 γ 蜡烷奇偶均势泥岩(高I型), 主要是黑页岩、钙片黑页岩之类页理发育的泥岩; 较高 γ 蜡烷偶奇优势泥岩(高II型), 主要是不具页理的灰色泥岩类。

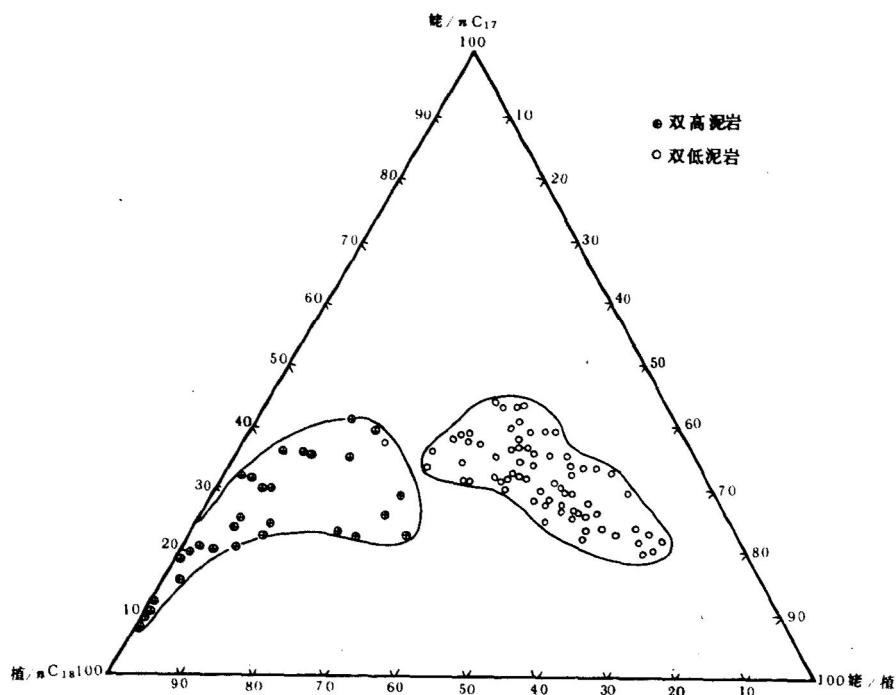


图2 类异戊二烯烷烃参数姥/植、植烷/ nC_{18} 、姥烷/ nC_{17} 分布三角图

1. 双低泥岩的次级二分性

将图1及表1对照起来分析,可以发现,双低泥质岩的地球化学次级二分性也较为分明。

(1) 低I型泥岩

包括表1岩相类型一栏1至3列诸岩相,其特点是不具纹理构造,常含粉砂。

无机地球化学上: $Sr/Ba \leq 1$, $Ca/Mg < 5$, Rb/Ca 、 Fe/Mn 比都较高,通常情况下,分别大于1和0.5, B/Ga 比、 V/Ni 比则相对较低。

有机地球化学上:(奥烷+ γ 羽扇烷)/藿烷 $C_{30} > 0.05$,干酪根以Ⅱ型为主,少量Ⅰ型和Ⅲ型,甾烷分子参数 C_{27}/C_{29} 多数小于1。

(2) 低Ⅲ型泥岩

该组泥岩以钙质纹层页岩相为代表。

无机及有机地化指标恰与高I泥岩对应而反向。即:无机地球化学上 $Sr/Ba > 1$, $Ca/Mg > 5$, Fe/Mn 、 Rb/Ca 比都较低,常分别为 < 0.5 和1, B/Ga 、 V/Ni 比则较高。

有机地球化学上,以I型干酪根为特征,干酪根显微组分中,腐泥组大于90%。(奥烷+ γ 羽扇烷)/ C_{30} 则小于0.05或为零,甾烷分子参数一般大于1。

2. 双高泥质岩的两级二分性

湖相泥质岩的二分性,以双高泥质岩表现得最为典型。双高泥质岩中的两类,即高I型和Ⅲ型泥质岩,在六个方面表现了一分为二的特点,除元素组成对比性稍差外,其他五个方面都形成反差强烈的对比。

(1) 高I型泥岩(超高 γ 蜡烷奇偶均势泥岩)

该类泥质岩以黑页岩、钙片黑页岩为代表。

无机地球化学上: B 含量在 60 ppm 与 100 ppm 之间, Sr/Ba 比通常小于 2 但大于 1, Ca/Mg 比大于 10。

正烷烃构成上, 具奇偶均势, OEP 一般为 0.90—1.15, 平均为 1.05。主峰碳以 nC_{23} 为主, 少数为 nC_{18} 、 nC_{25} 、 $\Sigma nC_{21}^-/\Sigma nC_{22}^+$ 一般为 0.31—0.81, 平均为 0.54; $(C_{21}+C_{22})/(C_{28}+C_{29})$ 平均为 1.18 (表 2)。

表 2 双高泥岩中低 I 及低 I 型代表岩石正烷烃构成实例

(渤海湾盆地济阳坳陷始新统沙四段正烷烃分析数据)

样 品 号	井 深	岩 性	碳数分布	主峰碳	$\frac{C_{21}+C_{22}}{C_{28}+C_{29}}$	$\frac{\Sigma nC_{21}^-}{\Sigma nC_{22}^+}$	OEP
W35—2	2135	黑 页 岩		C_{24}	0.99	0.41	0.90
W31—1	2497	页 岩	$C_{14}-C_{31}$	C_{23}	0.95	0.54	1.25
W31—2	2526	页 岩	$C_{14}-C_{34}$	C_{23}	1.02	0.35	1.15
W31—3	2573	页 岩	$C_{14}-C_{34}$	C_{23}	1.09	0.40	1.02
W7—1	2637	黑 页 岩	$C_{13}-C_{30}$	C_{23}	1.59	0.52	1.11
W7—2	2676.5	页 岩	$C_{13}-C_{31}$	C_{23}	1.49	0.51	1.06
C17—1	—	页 岩	$C_{13}-C_{33}$	C_{25}	0.96	0.31	1.04
D5—1	3049	页 岩	$C_{13}-C_{31}$	C_{25}	1.07	0.43	1.07
N11—2	3603	页 岩	$C_{11}-C_{34}$	C_{18}	1.44	1.09	1.06
N11—2	3607	页 岩	$C_{11}-C_{34}$	C_{18}	1.17	0.81	0.88
W35—2	2073	灰色泥岩	$C_{14}-C_{34}$	C_{27}	0.12	0.08	1.26
W35—3	2155.5	灰色泥岩	$C_{14}-C_{34}$	C_{26}	0.54	0.13	0.65
N5—1	2612	灰色泥岩	$C_{14}-C_{34}$	C_{28}	0.47	0.17	0.92
N5—2	2618	灰色泥岩	$C_{13}-C_{31}$	C_{27}	0.65	0.23	1.28
N5—3	2637	灰色泥岩	$C_{14}-C_{34}$	C_{28}	0.40	0.23	0.79
N5—4	2640	灰色泥岩	$C_{12}-C_{34}$	C_{28}	0.58	0.19	0.69
N5—5	2700	灰色泥岩	$C_{11}-C_{34}$	C_{28}	0.62	0.22	0.85

注: 表中灰泥岩包括灰色泥岩、灰色含膏泥岩及含盐泥岩, 表 3 同此。

植烷含量上, 具强植烷优势, 姥鲛烷浓度低, 因而 Pr/Ph 比值低, 一般 <0.4 , 平均 0.20, 最低为 0.06。Pr/ nC_{17} 平均 1.23, Ph/ nC_{18} 比值变化大, 最大可达 24.49, 平均 7.14 (表 3)。

伽马蜡烷含量超高, 一般大于 20%, 平均 22.56% (表 3)。

甾烷分子参数 C_{27}/C_{29} : 一般样品都是 $C_{27}>C_{29}>C_{28}$, $C_{27}/C_{29}\geq 1$ (表 3)。

(2) 高 I 型泥岩 (较高 γ 蜡烷偶奇优势泥岩)

该类泥岩有富钙泥岩、含膏、含盐泥岩等, 不具页理, 通常呈灰色调。上述五项指标特别是后五项与高 I 型形成鲜明对照。

无机地球化学: B >100 ppm, Sr/Ba >2 , Ca/Mg <10 。

正烷烃呈偶奇优势, OEP 值一般小于 1, 主峰碳以 nC_{27} 、 nC_{28} 为主, $\Sigma nC_{21}^-/\Sigma nC_{22}^+<0.23$, $(C_{21}+C_{22})/(C_{28}+C_{29})<0.65$ 。

具较高植烷优势, 姥鲛烷浓度较高, Pr/Ph 平均为 0.48; Pr/ nC_{17} 为 2.25; Ph/ nC_{18} 为 2.68。

表3 生物标志化合物分子参数 (渤海湾盆地始新统沙河街组四段)

样品号	深度	岩性	类异戊二烯烃参数					藿烷分子参数		甾烷分子参数			
			Pr	Ph	Pr/Ph	Pr/nC	Ph/nC	γ 蜡烷		C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉	C ₂₇ /C ₂₉
C11-1	2292-2302	页岩	25.18	57.15	0.44	3.01	6.14	34.62		49.99	19.65	30.27	1.65
W35-1	2135	页岩	5.20	82.1	0.06	1.48	16.62	36.16		28.24	27.92	43.85	0.64
W7-1	2637	黑页岩	10.40	58.77	0.18	0.85	3.17	24.17		45.40	25.78	29.02	1.56
W7-2	2676.5	页岩	11.27	59.24	0.19	0.88	0.28	22.88		44.85	26.74	28.41	1.58
N5-6	2646	页岩	21.03	54.52	0.39	0.61	4.79	29.50		39.93	19.86	40.21	0.99
D5-1	3049	页岩	10.54	30.91	0.34	0.39	0.97	3.91		41.09	21.50	37.41	1.10
W35-4	1984	灰色泥岩	16.67	45.67	0.37	0.85	2.53	4.55		29.81	25.70	44.49	0.67
W35-2	2073	灰色泥岩	14.85	45.24	0.33	0.78	2.16	3.31		28.24	27.92	43.85	0.64
N5-7	2597.5	灰色泥岩	24.78	46.9	0.53	1.98	2.96	1.30		34.24	20.83	44.93	0.76
N5-1	2612	灰色泥岩	29.22	41.75	0.70	2.49	2.44	8.2		32.47	23.70	43.83	0.52
N5-2	2618	灰色泥岩	25.21	46.16	0.55	1.91	2.99	2.46		30.93	21.39	47.71	0.65
N5-3	2637	灰色泥岩	26.60	50.71	0.52	4.26	3.08	5.96		38.44	22.99	38.57	1.00
N5-4	2640	灰色泥岩	23.56	47.51	0.50	2.62	2.38	4.06		32.47	22.03	45.50	0.71
W7-3	2603	灰色泥岩	15.51	51.44	0.28	1.43	3.04	2.61		28.76	19.24	52.00	0.55
W35-3	2155.5	灰色泥岩	5.06	87.28	0.07	1.99	17.01	15.72		30.94	24.31	44.76	0.69

伽马蜡烷含量较高,但低于高 I 型,一般 2.5%—5.96%,平均 7.16%。

甾烷分子参数所有样品都是 $C_{29} > C_{27} > C_{28}$, $C_{27}/C_{29} < 1$ (表 3)。以 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 相对百分含量作图也可将高 I 型与高 II 型分开来 (图 3)。

三、两级二分现象

成因分析

湖相泥质岩的二分性是其沉积时水介质的物理化学条件,以及在该条件下生存的生物和生物死亡后,形成的分散有机质的聚集保存条件的综合反映。

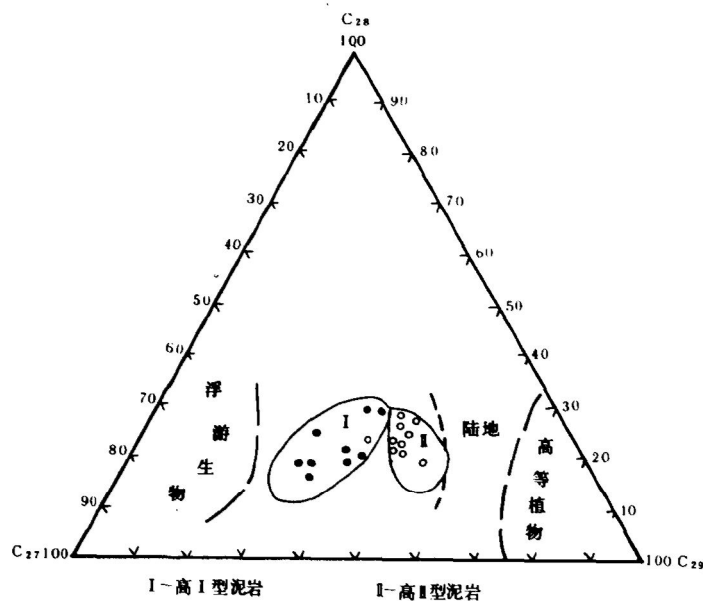


图3 高 I 型、高 II 型泥岩甾烷组成分区实例

(山东东营凹陷始新统)

(一) 地球化学参数对沉积环境与生物组合的标志意义

1. 元素地球化学因沉积介质影响而出现分异性

B含量、B/Ga、Sr/Ba、Fe/Mn；元素B含量、B/Ga、Sr/Ba比值普遍用来作为介质盐度的指标，这里不需赘述。元素Fe和Mn在沉积过程中的分异作用较为明显，而且主要受水介质的pH值与Eh值的控制，而pH值与Eh值又与介质盐度有关，因而Fe/Mn比与盐度也有一定关系，一般认为Fe/Mn比值越小，盐度越高。

V/Ni：过去常用来作为海陆相区分标志。一般随盐度的升高，还原程度的增强，由于有机质对V的吸附作用等原因，V的聚集作用十分明显，因而V/Ni比值高可能同时是高盐度和强还原程度的反映。

Rb/Ca：Rb易被粘土矿物吸附，因而在砂、泥岩中富集，而在碳酸盐岩中含量低。在渤海湾地区Rb与Ca丰度呈明显的负相关性，很可能与碳酸盐矿物的稀释作用有关。因而Rb/Ca比作为渤海湾地区性指标，在一定程度上可间接反映河流输入作用的强弱和湖中介质酸碱性的变化。

Ca/Mg：在陆相盆地中，河流相泥岩中Ca的含量往往低于Mg，而湖相泥岩中Ca含量显著高于Mg，如松辽盆地白垩系、济阳坳陷第三系。在湖泊中，由于钙盐与镁盐溶解度上的差异，镁盐比钙盐难于沉积，而且Ca的沉淀作用受介质酸碱度影响更为明显，故在湖相泥岩中Ca/Mg比可作为介质酸碱性的标志。但当湖水盐度过大，白云石沉淀造成沉积物中Mg的富集；又可使Ca/Mg值减少，高Ⅱ型泥岩的Ca/Mg值低于高Ⅰ型，可能就是这一原因造成的。

2. 分子化学参数因沉积介质影响出现分异性

有机地球化学家们发现，沉积岩中某些有机组成在热演化过程中有一定的稳定性，能直接或间接地反映沉积环境的物理、化学条件。

(1) 姥/植比 (Pr/Ph)

高等植物中的叶绿素、藻菌中的藻菌素，在微生物作用下都可以分解游离出植醇。在不同沉积环境与介质条件下，植醇向不同方向演化形成不同类型的类异戊二烯烷烃。在弱氧化、酸性介质条件下，植醇经氧化和脱羧基反应形成姥烷，还原偏碱性条件下，植醇经加氢和脱水作用后形成植烷。因而植烷优势（低姥/植比）可以表征沉积环境的还原条件。

(2) 强植烷优势

根据强植烷优势多出现在蒸发岩系的产状特点和植烷的形成机理，即高盐环境中与沉积物同时沉积的富含二植烷甘油醇醚的亲盐细菌在成岩过程中被降解，释放出大量植烷^[2]，强植烷优势可以表征水介质的高盐度特征。

(3) OEP值

在我国中、新生代盆地中，普遍发现正烷烃偶数碳对奇数碳优势（OEP<1）往往与植烷优势相伴生，而且多出现在蒸发岩系内。李任伟等^[2]发现，沉积岩中Pr/Ph和OEP值与反映沉积环境还原特征的自生黄铁矿含量呈正相关关系，OEP<1和强植烷优势的样品黄铁矿含量均大于50%。因此，OEP<1可能预示沉积介质的强还原性和高盐度特征。

(4) 伽马蜡烷

据研究^[3]，陆相盆地中高含量的伽马蜡烷的成因机理是（1）动物型有机质输入为主；（2）水介质具较高的盐度，但盐度过咸，伽马蜡烷含量又减少；（3）早期成岩中有机质处于强还原环境。Isaken^[4]也提出伽马蜡烷可作为古环境中超高盐水的标志。因此，双高泥岩的高

伽马蜡烷是该时期咸水环境特征的生物标志物,同时反映了有机质主要来源于水生低等浮游动物或低等嗜盐微生物,并在强还原条件下保存转化为烃类。而高Ⅰ型泥岩中伽马蜡烷含量明显低于高Ⅰ型的钙片页岩和黑页岩,可能与水介质盐度过大有关。

3. 分子化学参数因母质类型不同而出现差异性

(1) 藿烷分子参数(奥利烷+ γ -羽扇烷)/藿烷 C_{30}

奥利烷、羽扇烷都与特定的高等植物有关。在湖沼相和沼泽相中,如鄂尔多斯盆地三叠系延长统、侏罗系延安组腐殖型生油岩,保定凹陷下第三系河流沼泽相、四川盆地晚三叠世煤系中均发现较高含量的奥利烷或羽扇烷。因而低Ⅰ型泥岩中奥利烷、羽扇烷的存在标志着原始生物组合中陆源植物比例较高。

(2) 甾烷分子参数 C_{27}/C_{29}

Huang^[5]很早就发现不同沉积环境有机质其甾醇分布上的差异(图3),一般海相动物和水生浮游生物富含 C_{27} 甾醇, C_{29} 甾醇次之,陆生植物富含 C_{29} 甾醇, C_{28} 甾醇次之。因而 C_{27}/C_{29} 比值可以用来推断有机质原始母质类型。由图3可以看出,高Ⅰ型页岩类与高Ⅰ型泥岩类甾烷组成分布区域不同,黑页岩分布区更靠近浮游生物分布区,而泥岩分布区相对远离浮游生物区,向陆地和高等植物分布区靠近。表明高Ⅰ型页岩有机质母质类型主要以水生生物为主,而高Ⅰ型泥岩有机质中可能有一定比例的陆源组分。

4. 不溶有机质因母质类型不同而出现差异性

湖泊环境有机质来源的二分性,使其水体中陆源有机物和原地水生生物共存,因而作为有机残体的干酪根的显微组成和由其相对含量所确定的干酪根类型,主要取决于原始生态环境中水生生物和陆源植物的相对发育程度。水体较深、距岸较远的深水湖区或受河流作用影响较小的闭塞湖泊以水生浮游生物为主,而近岸浅水湖区为水生生物和陆生植物混合,这也是低Ⅰ型页岩与低Ⅰ型泥岩干酪根类型二分的主要原因。

(二) 一级二分性成因解释

将各类泥质岩的元素地球化学与分子化学参数特征与岩相类型及其沉积环境结合起来,可以发现在相似成熟级别的条件下,泥质岩的一级二分现象是由较大的沉积环境、沉积作用等内在因素,特别是水介质的化学性质决定的。双低泥质岩是淡水、半咸水环境下的产物,作为介质盐度的函数硼含量、 B/Ga 、 Sr/B 较低, Fe/Mn 比值高。其他元素比值的相应变化也与湖水盐度、酸碱性、含氧情况及导致湖水介质条件变化的河流作用有关。可以表征介质还原程度和盐度的有机分子参数,如植烷浓度低、 OEP 值大于1、 γ 蜡烷含量低,也表明双低泥岩形成于水循环作用良好、还原程度较弱、盐度较低的介质环境。双高泥质岩则是淡水补给作用弱、湖泊水体闭塞、循环作用差、盐度高、介质还原程度明显高于淡水湖泊的咸水湖泊(包括盐湖)沉积。

(三) 二级二分性成因解释

1. 双低泥质岩

双低泥质岩分出的两类(即低Ⅰ型和低Ⅱ型泥质岩)是淡水—半咸水湖泊沉积作用和生物化学作用的产物。由地球化学参数指标可以看出,低Ⅰ型泥岩形成于循环作用良好、水体充氧、偏碱性、弱还原,既有水生生物发育又有陆地植物输入的淡水湖泊。而低Ⅱ型钙质纹层页岩则沉积于具季节性分层的间歇性闭塞、还原性较强、以水生生物发育为主的半咸水湖泊。对比表1所列地球化学、沉积物理、矿物和生物特征(1)发育季节纹理;(2)粘土矿物

具定向组构；(3) 有机碳含量高 (2.5%—3%)；(4) 自生矿物组合出现方解石-白云石-黄铁矿类；(5) 一般缺少遗迹化石，局部地区可以见到可能的深水遗迹相——似沙蚕相蠕虫状迹；(6) 可有适合深水生活的 *Candona*, *Cyprois mina*, *Coupeiformes* 等生物化石组合；(7) 岩石呈深灰至黑灰色，这个结论是显而易见的。

上述表明，双低泥质岩的存在及其进一步二分现象，是由更加直接的沉积因素和生物化学因素所决定的。

2. 双高泥质岩

双高泥质岩分为两类。高 I 型泥岩以黑页岩、钙片黑页岩为代表，高 II 型则以含膏含盐泥岩为代表。

高 I 型泥岩中的黑页岩，可形成于多种沉积环境，包括陆棚、大洋盆地、盐度较高的滨海沼泽及咸水湖泊等。对黑页岩的形成具首要意义的是这些环境中的沉积和化学条件，如有机质生成能力、沉积速率和环境的含氧量，而环境缺氧又是黑页岩最重要的最基本的形成条件。我国东部海拉尔盆地油页岩、松辽盆地白垩系黑色页岩、鄂尔多斯盆地东部侏罗系延长统油页岩、抚顺油页岩、黑海底部沉积的黑页岩、北大西洋西部和东部太平洋中部白垩系黑页岩等均具备一个基本条件，即缺氧的强还原条件。

图特洛特提出了黑页岩沉积环境的三种模式，即限制性循环模式、开阔大洋模式、大陆架模式。湖相黑页岩应属限制性循环模式。黑页岩的颜色、层理的微细平整特征、较高的有机碳（一般 3%—7%，最高达 18%）和黄铁矿含量（平均 5%）、缺乏底栖生物等，均表明其形成时期湖泊底层水具备缺氧的强还原环境，而这种条件的形成又是相应时期内湖水盐度、温度和密度持久性分层的结果。

钙片黑页岩形成时气候条件可能较为干旱，由于气候改变引起的大气供水的周期性变化，导致水介质化学性质的不稳定性，在大气降水减少，水质较咸，pH 值较高时方解石化学沉淀作用增强，“钙片”形成。其特征同现代死海的纹层状蒸发岩和黑海海底沉积物相似。

黑页岩的主要沉积相标志有 (1) 颜色深，多为黑色、灰黑色、棕黑色；(2) 纹理发育；(3) 黑页岩的粘土矿物具定向组构；(4) 有机碳含量高，一般 >3%；(5) 自生矿物组合：方解石-白云石-黄铁矿；(6) 由于环境严重缺氧，一般缺少遗迹化石和原地底栖生物化石；(7) 生物属种单调或缺少生物化石，如渤海湾始新世的黑页岩中以广盐度的美星介属 (*Cyprinotus*) 为主，而钙片页岩不含任何门类的生物化石。将上述特征与表 1 地球化学参数及其标志的意义结合起来，说明黑页岩形成于永久性分层导致的环境闭塞、具强还原、碱性特征、喜盐生物发育的咸水湖泊。

高 II 型的含膏、盐泥岩形成于气候干旱，蒸发量远大于降雨量，湖水过咸、深度较浅、湖水的分层现象并不明显的超咸水湖泊。由于缺少盐跃层的封闭作用，底层的还原性也相对淡化期具分层现象的较深水闭塞湖泊差。于是悬浮物质的连续沉积与湖水中的化学沉积作用，形成了纹理不发育的灰色含膏含盐泥岩等。主要沉积相标志也证明了这一点：(1) 一般为灰色色调，有灰、暗灰、蓝灰、绿灰、深灰等；(2) 一般不发育层理，研究区此类泥岩以块状为主；(3) 有机碳含量变化大，一般较共生的页岩要低；(4) 自生矿物：方解石、白云石、石膏、少量天青石、菱镁矿等；(5) 古生物属种十分单调，如渤海湾盆地南部始新统的含膏泥岩中，就以广盐度的 *Cyprinotus igneus* 为主，约占介形类化石个体总数的 80%。

由此，对于双高泥质岩的存在及其两级二分的规律不难得出如下结论：

(1) 咸水湖相泥质岩,特别是页岩、黑页岩,有机质可能主要来源于盆内水生生物,如浮游动物,嗜盐细菌等。与双低泥质岩相比,陆地植物组分在泥质岩有机质组合中占很少比例,表明沉积时期盐度分层、湖盆闭塞、缺乏大型水系发育的古地理特征。

(2) 咸水湖相泥岩一系列地球化学参数规律性地呈现出明显的二分现象,是咸水湖相两类泥岩成因属性的体现。对于咸水湖相泥岩地球化学性质的差异,已有不少地球学家进行了深入的研究^[3,6]。本文的贡献则在于从泥质相分析入手,将这些差别系统化并确定出这些区别是泥岩的成因不同造成的。咸水湖相地球化学特征的二分现象与沉积环境和水介质的物理化学、生物化学条件的周期性变化密切相关。即页岩、黑页岩形成于咸水湖泊发育过程中水体相对较深、水域较广、水生生物较繁殖的相对淡化期;灰色含膏含盐泥岩等高Ⅰ型泥岩则形成于水体较浅、水域较小的过咸化时期。

四、结论与说明

(1) 因为湖相泥质岩两级二分现象是由其自身性质决定的规律性事实,所以我们希望其能成为一个定律,即:湖相泥质岩在地球化学上必定可以首先二分为高硼高伽马蜡烷泥质岩和低硼、低伽马蜡烷泥质岩。前者可二分为具高伽马蜡烷奇偶均势特征的黑色页岩类和具较高伽马蜡烷偶奇优势的含膏、盐泥岩类;后者则可再次二分为具高钙腐泥型干酪根特征的钙质纹层页岩类和具低钙混合型干酪根的含粉砂泥岩类。

(2) 地球化学二分性是据特征、性质、成因较清楚的盆地及相应岩相、地化资料得出的规律性认识。这一认识表明湖相泥质岩的成因类型是不同的,通过元素地球化学和有机地球化学参数,可以区分各类泥质岩的无机相和有机相特征,从而有利于对泥质岩的生烃能力进行评价。

(3) 上述认识的充分论证和进一步发展还有许多工作要做。比如第一,我们研究的湖相泥质岩类型中没有涉及冰川湖、火山湖及大气降水和海水双重补给的多层湖等所形成的所有湖相泥岩;第二,部分有机地球化学参数对热演化较敏感,我们尽量避免使用,但还不能说其影响已完全消除;第三,得出二分律依据的分析技术总是在不断进步的,统计判别时考虑的因素也难免不周。如此等等,都说明要使认识得到进一步发展完善,还有待广大同行的共同努力。因此我们热忱欢迎同行们的批评帮助。

参 考 文 献

- 1 邓宏文,钱凯. 深湖相泥岩的成因类型及其组合演化. 沉积学报, 1990; 8 (3): 1—21
- 2 李任伟等. 分子化学指标在中国东部盆地古环境分析中的应用. 沉积学报, 1988; 6 (4): 108—119
- 3 王锐良等. 不同沉积环境中伽马蜡烷的分布特征及其成因探讨. 中国科学院地球化学研究所研究年报, 1988; 100—107
- 4 Isaken G H. 分子地球化学有助于勘探. 郑永吉译. 石油地质科技动态, 1992; (1): 16—23
- 5 Huang W Y, Meinschein W G. Sterols as ecological indicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1979, 43: 739—745
- 6 王锐良等. 生物标志化合物在盐湖沉积物中的定量组成和分布. 中国科学院地球化学研究所研究年报, 1987; 109—120

• 黄汝昌,王广玉. 不同沉积环境中有机质特征及成烃机理,石油部石油勘探开发研究分院,中国科学院兰州地质研究所, 1986.

GEOCHEMICAL BINARY DIVISION CHARACTER OF LACUSTRINE ARGILLITE

Den Hongwen

(*China University of Geosciences*)

Qian Kai

(*Natural Gas Branch, Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC*)

Abstract

Fourty lithofacies can be distinguished in lacustrine argillite according to the geochemical research of Mesozoic-Cenozoic terrestrial basins. All the lithofacies types can be simplified by using geochemical binary-division character, i. e, depending upon geochemical parameters, lacustrine argillite can be divided into the argillite with lower boron and gammacerane abundance and with higher boron and gammacerane. The former can be subdivided into the argillite with lower calcium abundance mixed-type kerogen and with higher calcium abundance sapropel-type kerogen (simply named as type-L₁ and type-L₂ argillite respectively); the latter can be subdivided into the argillite with high gammacerane abundance balance of even over odd carbon number *n*-alkanes ($OEP \approx 1$) and with higher gammacerane abundance, even numbered carbon predominance *n*-alkanes ($OEP < 1$) (simply named as type-H₁ and type-H₂ argillite respectively). The concrete characters of argillite with lower boron and gammacerane abundance are as follows: lower B/Ga (< 4), Sr/Ba (< 1 generally) and V/Ni (< 10), gammacerane (2.5%), higher Pr/Ph (< 1), $OEP > 1$, in which type-L₁ argillite shows higher Rb/Ca (> 1), lower Ca/Mg (< 5), type- I kerogen dominant, C_{27} -sterane/ C_{29} -sterane < 1 , oleanane+lupane/ C_{30} -hopane > 0.05 ; type-L₂ argillite shows lower Rb/Ca (< 1), higher Ca/Mg (> 5), type- I kerogen, C_{27} -sterane/ C_{29} -sterane > 1 , oleanane+lupane/ C_{30} -hopane < 0.05 . In contrast, the characters of argillite with higher boron and gammacerane are as follows: higher B/Ga (> 4), Sr/Ba (> 1) and V/Ni (> 10), gammacerane ($> 2.5\%$), lower Pr/Ph

indicator of hypersaline environment; (3) A preference of even over odd carbon number-alkanes ($OEP < 1$) is an indicator of reducing condition; (4) Pr/Ph is an indicator of oxidation-reduction environment; (5) Kerogen type is the indicator of primary organic matter type; (6) C_{27} -sterane/ C_{29} -sterane has been used for the analysis of organism types; (7) Triterpane compound oleanane and lupane are the indicator of terrestrial plant input. Depending upon the molecular parameters mentioned above and combining depositional-physical characters, lithology mineralogy and palaeontology, the following conclusion could be gotten: geochemical binary division character of lacustrine argillite is mainly a re-