

渤海湾盆地黄骅坳陷湖相碳酸盐岩 微量元素特征及沉积环境

王永炜^{1,2}, 李荣西¹, 高胜利³, 高鹏鹏³, 李泽敏², 高潮², 付明义²

(1. 长安大学, 西安 710054; 2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司 研究院, 西安 710075; 3. 西安石油大学, 西安 710065)

摘要:渤海湾盆地黄骅坳陷沙一下段主要以碳酸盐岩储层为主, 是区内主要油气储层。黄骅坳陷孔店—羊三木地区、齐家务地区和歧南地区沙一下段微量元素特征表明, 其含量及分布在不同区带差异明显, 但 Sr、Ba、Mn 等元素的含量在各区较为接近, 而 Ni、Pb、Zn 等元素的含量由齐家务向孔店—羊三木一带趋于减少, 反映了黄骅坳陷湖盆碳酸盐岩在沉积成岩过程中沉积环境条件的变化。齐家务地区 B 元素含量为 $(7.55 \sim 92.8) \times 10^{-6}$, 平均 42.8×10^{-6} , 孔店—羊三木地区 B 元素含量为 $(7.2 \sim 97.4) \times 10^{-6}$, 平均 45.21×10^{-6} , 反映出湖盆水体在沙一下段沉积期均具有咸化与淡化的交替过程。孔店—羊三木地区沙一下段各类样品中的 Ti 含量为 $(946 \sim 3495) \times 10^{-6}$, 平均 2319×10^{-6} , 显示近物源的特点。V/(V+Ni) 比值变化显示出全区强还原环境的特点, 同时 Th/U 比值较低的特征, 说明湖盆水体盐度较高或受到了入侵海水的影响。

关键词:微量元素; 湖相碳酸盐岩; 沉积环境; 沙河街组; 黄骅坳陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.221

文献标识码: A

Trace element characteristics and sedimentary environment of lacustrine carbonate rocks in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

Wang Yongwei^{1,2}, Li Rongxi¹, Gao Shengli³, Gao Pengpeng³, Li Zemin², Gao Chao², Fu Mingyi²

(1. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 3. Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Carbonate rocks dominate in the lower part of the first member of Shahejie Formation in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. The geochemical characteristics of trace elements in Kongdian-Yangsanmu, Qijiawu and Qinan show that the content and distribution of trace elements varied in different pays, but those of Sr, Ba, V, Mn, Th, U were similar, and the contents of Ni, Pb, Zn and others tended to decrease from Qijiawu to Yangsanmu, indicating environmental changes during the diagenesis process. The B content varied $(7.5 \sim 92.8) \times 10^{-6}$ with an average of 42.8×10^{-6} in Qijiawu, and varied $(7.2 \sim 97.4) \times 10^{-6}$ with an average of 45.21×10^{-6} in Kongdian-Yangsanmu, indicating an alternating process of saline to fresh water environments. The Ti content varied $(946 \sim 3496) \times 10^{-6}$ and averaged 2319×10^{-6} in the lower part of the first member of Shahejie Formation from Kongdian to Yangsanmu, showing nearby provenance characteristics. The V/(V+Ni) ratio indicated strong reducing environment in the study area, and the low Th/U ratio showed a higher salinity of lake water or the influence of seawater intrusion.

Key words: trace element; lacustrine carbonate rock; depositional environment; Shahejie Formation; Huanghua Depression; Bohai Bay Basin

断陷湖盆碳酸盐岩具有较好的勘探前景。我国已在 413 个断陷湖盆碳酸盐岩油气藏中探明了石油地质储量 34843.76×10^4 t, 技术可采储量 5811.08×10^4 t; 天然气地质储量 624.74×10^8 m³, 技术可采储量 284.75×10^8 m³。在渤海湾盆地古近系、柴达木盆地西部古近系、苏北盆地古近系阜宁

组、四川盆地侏罗系、松辽盆地地下白垩统等地层中, 发现良好的碳酸盐岩储油气层, 甚至是高产油气层。多年来, 对断陷湖盆碳酸盐岩储集性、烃源岩、油气成藏方面及微量元素的含量和组合进行了研究, 取得了许多认识^[1-11]。在实际工作中, 微量元素的选择应根据具体目的和任务来确定, 通常是筛

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-10-10。

作者简介: 王永炜 (1965—), 男, 博士生, 高级工程师, 从事油气勘探开发综合研究。E-mail: wangyw7879@163.com。

通信作者: 高胜利 (1974—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事石油及天然气地质研究。E-mail: 001gsl@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2008ZX05005-004-007HZ) 资助。

选具有特征意义的元素^[12-14]。

本文针对黄骅拗陷沙河街组湖相碳酸盐岩元素地球化学特征进行分析,以期为断陷湖盆碳酸盐岩的研究提供理论指导。

1 区域位置

黄骅拗陷湖盆位于渤海湾裂谷盆地的腹部,是渤海湾裂谷盆地内最大的含油气断陷湖盆之一,呈 NE40°展布,南西窄,向东北逐渐变宽并与渤中断陷湖盆相连;北西以沧东断裂与沧县隆起带相分隔,南东与埕宁隆起相接;北西与燕山褶皱带为邻,南西与临清断陷湖盆相连,南东与济阳断陷湖盆相接。根据区域构造特征,将黄骅拗陷湖盆分布区划分为 3 个北东东走向的构造单元,即沧县隆起带、黄骅拗陷带和埕宁隆起带(图 1)。其中沧县隆起带与黄骅断陷带之间以沧东断裂分隔,黄骅拗陷带与埕宁隆起带之间以雁式排列的埕西断裂带为界。雁式排列的断层在一些地段以突变的断裂相分割,而在另一些地段以斜坡相过渡,以不同尺度的北东—北东东向正断层为特征(图 1)。

2 目的层段岩性及地层特征

黄骅拗陷沙河街组是最主要的目的层。该组地层自下而上可分为沙河街组四段、三段、二段和一段,其中沙四段在研究区未普遍发育,沙四段与孔店组一段一同划分为孔店组岩性旋回的顶部旋回层^[2]。沙河街组三段与一段地层在区里发育普遍,沙一段在黄骅拗陷分布范围最广,也是主要的生、储油层系之一^[15],其一般厚度为 300~400 m,

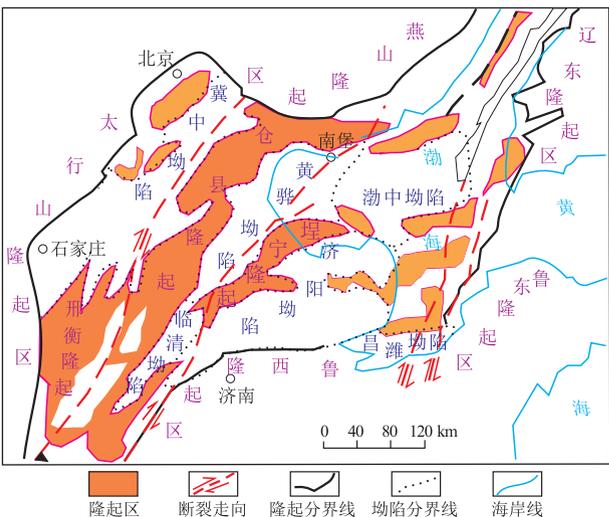


图 1 渤海湾盆地黄骅拗陷湖盆构造位置示意

Fig.1 Structural location of the Huanghua Depression in lacustrine basin, Bohai Bay Basin

最大厚度超过 2 000 m。沙一段沉积时为黄骅拗陷湖盆第二次大规模湖侵期,自上而下分为 Es_1^s 、 Es_1^z 和 Es_1^f 3 个亚段。沙一段沉积中心基本与沙三段沉积时一致,主要沿各主要二级断裂下降盘分布,但具有向东南方向迁移的特征,地层分布的延展趋势也由北东向部分转为近东西向。沙一段上部(Es_1^s)为大段连续沉积的暗色泥岩,厚 80~200 m;中部(Es_1^z)为多旋回砂泥互层,并夹有油页岩及泥灰岩,一般厚度为 50~100 m;下部(Es_1^f)主要为碳酸盐岩夹油页岩及钙质泥岩和少量砂岩,一般厚度为 70~150 m,碳酸盐岩主要分布在歧南凹陷及其以南各次凹中,向歧口主凹陷则逐渐变为三角洲砂岩及重力流沉积。沙一下亚段(Es_1^f)自上而下可划为 Es_1^{f1} (板 2)、 Es_1^{f2} (板 3)、 Es_1^{f3} (板 4)和 Es_1^{f4} (滨 1) 4 个小层(油组),其中 Es_1^{f3} (板 4)和 Es_1^{f4} (滨 1)是区内主要油气储层(图 2)。

3 微量元素特征

样品采自黄骅拗陷中部的齐家务、孔店—羊三木以及歧南地区的沙一下亚段^[16-17]。

3.1 微量元素的含量及组合特征

根据黄骅断陷湖盆碳酸盐岩的主要岩石类型,采用日产 3080E3X 射线荧光光谱仪与荷兰帕纳科 AxiosX 射线光谱仪重点进行了标志性元素的检测,其灵敏度为 10^{-6} ;并通过样品的相互检测与内外复测,其误差基本在允许范围内(表 1~3)。黄骅

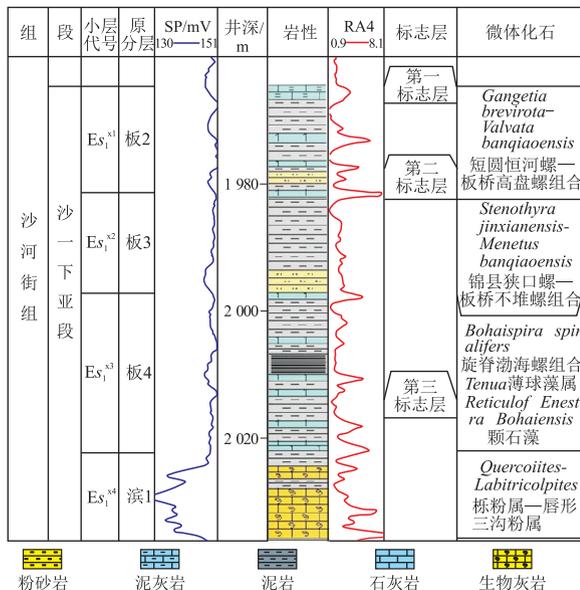


图 2 渤海湾盆地黄骅拗陷古近系沙河街组一段下亚段小层(油组)划分

Fig.2 Division of the lower part of the first member of Shahejie Formation in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

表 1 渤海湾盆地黄骅拗陷孔店—羊三木地区沙一下亚段微量元素分析结果

Table 1 Geochemical characteristics of trace elements of the lower part of the first member of Shahejie Formation in the Kongdian-Yangsanmu areas, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

井号	岩性	层位	微量元素含量/ 10^{-6}													
			P	Sc	Ti	V	Mn	Cu	Zn	Sr	Zr	Ba	Pb	Li	Be	Cr
孔 60	含介形虫灰质砂岩	E_{s1}^{s1} (板 2)	845	12.4	2 870	108	542	34.7	101	605	150	602	24.6	39.2	1.76	42.1
孔新 32	伊利石泥岩	E_{s1}^{s2} (板 3)	891	13.8	3 049	84.3	240	26.6	80.91	661	169	778	22.2	47.7	1.97	86.2
孔新 32	砂质有孔虫灰岩	E_{s1}^{s3} (板 4)	1 126	8.8	2 053	33.3	329	16.1	46.2	404	146	361	16.1	16.8	0.96	68.4
孔新 32	含介屑泥岩		645	11.4	3 720	62.1	880	23.4	68.2	322	227	538	30.7	27.9	1.83	48.4
孔新 32	砂质含云灰岩		461	7.1	1 291	27.9	615	3.6	21.6	845	96	756	11.4	11.5	0.58	55.5
孔新 32	砂质含云灰岩		495	6.0	946	28.3	741	2.0	14.7	921	88	744	9.2	10.9	0.40	40.2
孔新 32	含生物砂质灰岩		793	5.6	1 115	15.7	437	7.9	17.2	463	183	409	13.6	8.44	0.48	14.8
孔新 32	砂质介屑灰岩		1 920	12.3	2 214	51.5	484	18.2	43.5	606	131	457	19.6	21.5	1.29	35.2
孔新 32	含生屑岩屑砂岩		1 014	11.3	3 495	58.1	249	16.3	39.2	496	232	635	18.7	19.7	1.06	67.5
孔新 32	灰质岩屑砂岩		2 347	11.3	2 470	33.4	1 168	13.1	27.9	417	206	543	15.7	17.5	0.94	33.9
孔新 32	灰质岩屑砂岩		2 002	9.3	2 130	33.9	926	10.3	26.2	424	201	502	14.1	13.3	1.01	27.9
孔新 32	砂质灰岩		E_{s1}^{s4} (滨 1)	1 106	8.8	2 471	45.2	1 340	13.9	26.5	457	140	502	13.9	15.6	1.01
孔新 32	岩屑砂岩	845		5.2	2 527	36.3	424	14.8	33.7	348	343	772	17.8	16.2	0.98	38.5
孔新 32	灰质岩屑砂岩	1 114		7.1	1 795	27.7	969	7.3	19.3	426	221	618	12.6	12.8	0.71	32.2
孔新 32	不等粒砂岩	599		5.1	2 641	41.5	1 025	10.8	32.9	413	262	586	16.2	17.2	1.00	18.7
	平均值		1 080	9.0	2 319	45.8	691	14.6	39.9	587	186	587	17.1	19.8	1.07	44.5

井号	岩性	层位	微量元素含量/ 10^{-6}										Zr/ Al	V/ (V+Ni)	V/ Cr	Sr/ Ba	B/ Ga	Th/ U
			Co	Ni	Rb	Cs	Th	U	Ga	B								
孔 60	含介形虫灰质砂岩	E_{s1}^{s1} (板 2)	10.80	22.30	85.40	7.30	8.04	5.18	19.60	97.40	0.04	0.83	2.57	1.00	4.97	1.55		
孔新 32	伊利石泥岩	E_{s1}^{s2} (板 3)	12.50	29.20	96.50	8.12	8.08	5.96	21.30	130.00	0.03	0.74	0.98	2.13	6.10	1.36		
孔新 32	砂质有孔虫灰岩	E_{s1}^{s3} (板 4)	6.44	20.80	52.40	2.72	6.16	7.26	12.20	43.40	0.05	0.62	0.49	1.12	3.56	0.85		
孔新 32	含介屑泥岩		9.49	20.40	86.10	4.69	8.21	4.25	17.80	65.40	0.05	0.75	1.28	0.60	3.67	1.93		
孔新 32	砂质含云灰岩		2.82	8.44	28.80	1.44	6.00	3.32	7.30	23.90	0.07	0.77	0.50	1.12	3.27	1.81		
孔新 32	砂质含云灰岩		3.81	11.40	20.00	0.73	3.65	3.15	6.20	25.50	0.08	0.71	0.70	1.24	4.11	1.16		
孔新 32	含生物砂质灰岩		2.47	7.52	32.60	0.90	3.70	2.26	8.20	35.80	0.10	0.68	1.06	1.13	4.37	1.64		
孔新 32	砂质介屑灰岩		8.98	20.70	54.90	3.69	6.35	2.51	13.50	18.00	0.04	0.71	1.46	1.33	3.33	2.53		
孔新 32	含生屑岩屑砂岩		10.60	27.80	67.90	3.02	6.36	2.01	15.70	40.30	0.06	0.68	0.86	0.78	2.57	3.16		
孔新 32	灰质岩屑砂岩		7.29	15.40	54.60	2.31	6.64	2.82	12.70	18.50	0.06	0.68	0.99	0.77	1.46	2.36		
孔新 32	灰质岩屑砂岩		3.71	10.30	49.50	2.16	2.37	2.20	12.20	44.80	0.07	0.77	1.22	0.84	3.67	1.08		
孔新 32	砂质灰岩		E_{s1}^{s4} (滨 1)	5.08	14.80	50.90	2.51	5.82	1.78	12.20	42.40	0.05	0.75	0.79	0.91	3.48	3.27	
孔新 32	岩屑砂岩	11.90		23.60	65.90	1.77	6.88	3.32	14.10	19.30	0.10	0.61	0.94	0.45	1.37	2.07		
孔新 32	灰质岩屑砂岩	7.16		18.10	43.50	1.28	4.93	2.99	10.30	66.80	0.09	0.60	0.86	0.69	6.49	1.65		
孔新 32	不等粒砂岩	4.95		9.07	69.00	2.54	5.71	2.42	14.90	7.20	0.07	0.82	2.22	0.70	0.48	2.36		
	平均值		7.20	17.30	57.20	3.01	5.93	3.43	13.20	45.20	0.06	0.71	1.13	0.99	3.39	1.92		

地区不同区带检测的微量元素数量虽有不同,但对具有特征意义的元素都进行了检测。其中歧南地区重点检测了 V、Ni、Sr、Ba、Th、U 等 6 个元素,齐家务地区重点检测了 Mn、Pb、Zn、Cu、Cr、Ni、Ga、Sr、Ba、B 等 10 个元素,孔店—羊三木地区重点检测了 P、Sc、Ti、V、Mn、Cu、Zn、Ga、Sr、Zr、B、Ba、Pb、Li、Be、Cr、Co、Ni、Rb、Cs、Th、U 等 22 个元素。其检测层位和区带基本覆盖了碳酸盐岩分布区。但不同区带不同层段不同岩类之间的微量元素含量则

具有较大的差异,这些差异,是由于各种元素本身的地球化学性质与形成环境所导致的必然结果。各种微量元素的含量及组合特征,明显反映了黄骅拗陷湖盆碳酸盐岩在沉积成岩过程中的水体深度、物质来源、盐度指数、古气候及氧化—还原条件的变化。从沙一下亚段微量元素分析结果(表 1~3)可以看出,其含量不仅在不同区带差异明显,而且在不同岩类中变化也较大,但 Sr、Ba、Mn 等元素的含量在各区较为接近(图 3)。

表 2 渤海湾盆地黄骅坳陷齐家务地区沙一下亚段微量元素分析结果
Table 2 Geochemical characteristics of trace elements of the lower part of the first member of Shahejie Formation in the Qijiawu area, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

井号	岩性	层位	微量元素含量/ 10^{-6}										Sr/Ba	B/Ga
			Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Ga	Sr	Ba	B	Mn		
旺 35	砂质泥晶灰岩	Es ₁ ^{x2} (板 3)	21.4	45.8	76.8	34.4	440	12.6	699	86.4	65.4	585	8.09	5.19
旺 35	生物鲕粒云质灰岩		25.1	49.2	58.4	13.7	44.1	1.56	1 049	51.6	<1.0	276	20.33	
旺 36	含介形虫泥岩		20.9	40.4	46.4	40.3	32	11.8	779	201	30.8	153	3.88	2.61
旺 36	泥—亮晶砂屑云质灰岩		11.1	32.2	27.2	11	29.2	1.4	1 270	98.2	<1.0	281	12.93	
旺 36	泥微晶生物含云灰岩		16.8	39.7	32.9	36.1	32.5	4.54	1 517	91.8	<1.0	396	16.53	
旺 22	角砾状泥晶灰质白云岩	Es ₁ ^{x3} (板 4)	67.8	79.1	307	35.8	266	3.09	271	31.8	<1.0	769	8.52	
旺 22	泥晶灰质白云岩		79.5	43	266	46.8	180	6.63	338	45.5	18.9	620	7.43	2.85
旺 35	泥灰岩		54.8	366	840	50.8	51.5	17	1 336	127	69.9	353	10.52	4.11
旺 38	灰质油页岩		25.6	31.8	57.8	48.4	39.3	13.1	1340	171	19.2	859	7.84	1.47
旺 1104	泥灰岩		14.9	36	31.6	37.3	30.8	15	478	208	47.2	434	2.3	3.15
旺 1104	细晶鲕粒灰岩		27.3	64.9	65.9	20.7	52.8	3.41	847	107	<1.0	463	7.92	
旺 1105	云质泥灰岩		21.1	44	68.2	77.6	35	6.4	803	84.1	9.64	647	9.55	1.51
旺 1105	泥质灰岩		28.5	44.4	61.3	43.6	41	16.2	1 054	182	35	496	5.79	2.16
旺 30	介屑泥晶砂质灰岩		22.3	38.9	88.4	37.8	49	14.8	829	218	24.6	435	3.8	1.66
旺 38	泥微晶介屑含云灰岩		10.9	43.9	20.2	17.7	26	3.05	1 568	104	<1.0	538	15.08	
旺 38	含砂灰质伊利石泥岩	25.3	33.8	84.8	91.9	48.5	20.9	1 273	188	92.8	427	6.77	4.44	
旺 38	亮晶鲕粒灰岩	Es ₁ ^{x4} (滨 1)	37.6	62.5	78	27.1	34.1	6.59	1 079	70.5	7.85	543	15.3	1.19
旺 38	含生物灰质泥岩	37.4	43.1	102	54.5	46.8	19.4	852	127	63.3	266	6.71	3.26	
旺 1102	粉砂质伊利石泥岩	49.2	21.5	75	162	50.1	24.3	280	250	122	187	1.12	5.02	
旺 1104	灰质长石砂岩	28.2	48.4	84.6	39	41.3	14.1	638	154	28.4	336	4.14	2.01	
旺 1105	泥晶含云灰岩	42.7	774	1962	28.4	41.3	5.71	1441	42.4	7.55	314	33.99	1.32	
	平均值		31.8	94.4	211	45.5	76.7	10.6	940	126	42.8	489	9.93	2.8

表 3 渤海湾盆地黄骅坳陷歧南地区沙一下亚段微量元素分析结果
Table 3 Geochemical characteristics of trace elements of the lower part of the first member of Shahejie Formation in the Qinan area, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

井号	岩性	层位	微量元素含量/ 10^{-6}						V/(V+Ni)	sr/Ba	Th/U	
			V	Ni	Sr	Ba	Th	U				
旺 31	云质泥岩	Es ₁ ^{x1} (板 2)	30.0	14.66	941.3	661.7	9.63	3.46	0.67	1.42	2.78	
军 8	泥岩		54.0	100.10	2 343.0	1 287.0	7.28	3.03	0.35	1.82	2.40	
滨 22	泥岩	Es ₁ ^{x2} (板 3)	83.0	58.22	707.1	829.4	9.33	3.03	0.59	0.85	3.08	
房 29	云质泥岩	Es ₁ ^{x3} (板 4)	122.0	30.30	954.0	623.0	3.48	2.01	0.80	1.53	1.73	
房 10	白云岩		51.3	7.20	1 395.0	593.0	0.70	0.55	0.88	2.35	1.27	
房 10	灰质云岩		92.3	33.60	1315.0	665.0	1.10	0.59	0.73	1.98	1.86	
滨 22	白云岩		12.0	9.45	1 617.0	1 157.0	1.79	0.61	0.56	1.40	2.94	
埕 54×1	白云岩		14.0	11.66	1 318.0	1 167.0	1.02	0.79	0.55	1.13	1.30	
埕 54×1	泥质云岩		54.0	40.86	765.8	350.9	1.47	1.63	0.57	2.18	0.90	
埕 54×1	泥岩		65.0	35.66	910.0	638.1	2.48	1.47	0.65	1.43	1.69	
房 10	泥岩		48.0	31.47	2 978.0	1 059.0	2.36	0.89	0.60	2.81	2.67	
房 29	泥岩		73.0	40.27	904.7	773.7	1.24	0.45	0.64	1.17	2.77	
扣 42	灰质泥岩		Es ₁ ^{x4} (滨 1)	75.3	17.70	1 825.0	730.0	1.84	0.62	0.81	2.50	2.97
扣 42	鲕灰岩	13.8		3.82	2 824.0	570.0	5.49	1.60	0.78	4.95	3.43	
扣 42	白云岩	31.6		6.05	1 628.0	574.0	2.04	0.61	0.84	2.84	3.35	
扣 42	白云岩	16.5		5.24	2 574.0	611.0	10.78	4.30	0.76	4.21	2.51	
扣 42	螺灰岩	13.1		8.46	1 429.0	445.0	9.74	3.82	0.61	3.21	2.55	
扣 42	生物灰岩	13.0		7.62	510.0	634.0	8.86	3.75	0.63	0.80	2.36	
庄 64	云质灰岩	22.3		11.00	2 850.0	769.0	12.33	3.91	0.67	3.71	3.15	
滨 22	白云岩	18.0		9.93	1 719.0	705.1	8.31	3.24	0.64	2.44	2.57	
埕 54×1	白云岩	15.0		10.60	1 609.0	923.8	9.89	4.05	0.59	1.74	2.44	
滨 22	泥岩	63.0		40.97	2 119.0	1 117.0	13.04	3.41	0.61	1.90	3.83	
埕 54×1	泥岩	71.0		43.30	823.7	401.6	3.40	2.33	0.62	2.05	1.46	
埕 54×1	泥岩	86.0		34.25	591.7	707.0	8.61	3.52	0.72	0.84	2.45	
	平均值			47.4	25.52	1 527.0	749.7	5.67	2.24	0.66	2.14	2.44

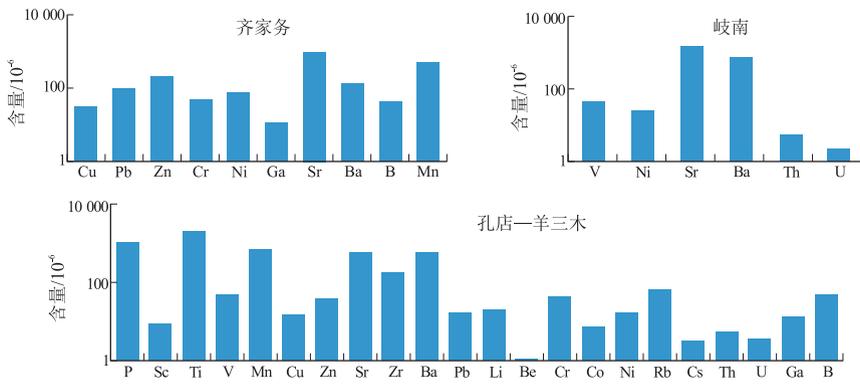


图3 渤海湾盆地黄骅坳陷不同区带碳酸盐岩微量元素含量直方图

Fig.3 Trace element contents in carbonate rocks in different areas in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

黄骅断陷湖盆碳酸盐岩中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 等微量元素,在齐家务地区沙一下亚段各层不同岩类的含量普遍高于歧南与孔店—羊三木地区(图3),其原因除了齐家务一带湖盆环境相对闭塞、水循环受限、还原性较强外,还与该区震裂塌陷、沉积物中的陆源基性组分与湖底深部沿断裂上升的热流体作用有关。一般在海相沉积物中 P、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、V 等微量元素普遍高于陆相沉积物。其中 Ni 的变化以 40×10^{-6} 为界,齐家务地区 21 个样品,低于 40×10^{-6} 的仅有 8 个,并以介壳泥晶灰岩与灰质油页岩为主,而大多数样品则以 Ni 平均含量高达 76.7×10^{-6} 为特征;孔店—羊三木地区 15 个样品中的 Ni 含量普遍低于 30×10^{-6} ,而 Cu、Pb、Zn、Cr 等元素也相应低于齐家务地区;歧南地区 24 个样品中的 Ni 含量高于 40×10^{-6} 的样品仅有 6 个,并且以泥岩为主,碳酸盐岩样品的 Ni 含量普遍低于 40×10^{-6} 。P、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、V 等微量元素在湖盆泥质岩中的富集,往往与湖底热流体活动具有直接关系,特别是元素 P 含量的不断增高,指示了较强的湖底热流体活动。湖底热流体不但为生物提供了生命活动所需要的 P、N、K、S 等元素,而且还能为生物的生命活动提供能量。而微生物又能使湖底热流体中 P、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、V 等微量元素相对富集。因而齐家务地区在沙一下亚段沉积期的还原环境及沿深部断裂上升的热流体影响较孔店—羊三木和歧南地区强烈。

黄骅坳陷沙一下亚段碳酸盐岩及部分灰质泥岩,其 Sr 含量大都高于 $1\,000 \times 10^{-6}$,而含砂较高的碳酸盐岩其 Sr 含量大都低于 $1\,000 \times 10^{-6}$;伊利石泥岩的 Ga、Sr、Ba、B 等亲碱性元素含量相对较低,但随钙含量的增加,Sr 含量也达到 $1\,000 \times 10^{-6}$ 以上。B 元素在环境分析中应用较广,水体中 B 元素含量与盐度呈线性关系。海水中 B 含量变化在 $(20 \sim$

$980) \times 10^{-6}$,淡水中为 $(0.15 \sim 1) \times 10^{-6}$ 。一般海相沉积物中 B 元素含量大于 100×10^{-6} ,陆相淡水沉积物小于 100×10^{-6} 。齐家务一带 B 元素含量低于 1×10^{-6} 的有 6 个样品,大于 100×10^{-6} 的只有 1 个样品,其他样品 B 元素含量变化在 $(7.55 \sim 92.8) \times 10^{-6}$ 之间,平均 42.8×10^{-6} ;孔店—羊三木地区 B 元素含量大于 100×10^{-6} 的也只有 1 个样品,其他样品 B 元素含量变化在 $(7.2 \sim 97.4) \times 10^{-6}$ 之间,平均 45.21×10^{-6} ,反映出湖盆水体在沙一下段沉积期均具有咸化与淡化的交替过程。Ba 元素也是指示沉积环境的灵敏剂,海相环境中 Ba 元素含量为 $(10 \sim 30) \times 10^{-6}$,一般不超过 200×10^{-6} 。黄骅坳陷齐家务地区 Ba 元素含量为 $(31.8 \sim 250) \times 10^{-6}$,平均为 126×10^{-6} ,仅有 4 个样品超过 200×10^{-6} ;孔店—羊三木地区 Ba 元素含量为 $(361 \sim 778) \times 10^{-6}$,普遍超过了 200×10^{-6} ;歧南地区 Ba 元素含量为 $(401.6 \sim 1\,267) \times 10^{-6}$,平均高达 749.68×10^{-6} ,可见歧南、孔店—羊三木地区沙一下亚段沉积期受海水或蒸发作用的影响,Ba 元素含量明显高于齐家务地区(图3)。

微量元素中 Ti、Zr、Rb、Sc 是典型的亲陆性元素,以机械迁移为主,沉积于滨、浅湖中,常作为分析物源区远近的指标,越远离物源区,其含量越低。孔店—羊三木地区沙一下亚段各类样品中的 Ti 含量在 $(946 \sim 3\,495) \times 10^{-6}$ 之间,平均为 $2\,319 \times 10^{-6}$,显示近物源的特点。而 Zr 在滨、浅湖中的含量明显高于半深湖或深湖沉积物中的含量,并且可作为寻找古湖岸线的标志。由于 Zr 主要以锆石等稳定矿物形式存在,密度较大,不易随黏土等细粒物质远距离迁移,故经黏土的主要组分 (Al_2O_3) 标准化后的 Zr 含量(即 Zr/Al 比值),更能反映陆源组分搬运距离及水体深度。孔店—羊三木地区 15 个样品经过 Al_2O_3 标准化后的 Zr 含量变化,在含砂生物灰岩和伊利石泥岩中含量较低,一般变化在 $(0.03 \sim$

以上,而 Ga 元素在陆相泥岩中含量较高,因此 B/Ga 比值常作为测定古盐度的标志。在以往的研究中,利用 B/Ga 比值判识沉积环境,研究沉积物中古盐度已有不少成果,如海相沉积物的 B/Ga 比值均大于 4.5,而陆相沉积物 B/Ga 比值普遍小于 3.3^[21-22]。

黄骅坳陷湖盆碳酸盐岩中不同岩类的 B/Ga 比值,在检测的 46 个样品中,B/Ga 比值大于 4.5 的样品为 5 个,小于 3.3 的样品为 16 个,其余样品介于 3.3~4.5 之间,这部分样品约占总样品的 55%。将黄骅地区齐家务和孔店—羊三木 36 个样品点投影在图上,结果大部分样品点落在陆相及分界线附近,显示出由淡水向半咸化过渡的特征(图 7)。根据 B、Ga、Rb 元素含量三角图投点结果,大部分样品点落入淡水区,而过渡带仅有 2 个样品点(图 8),这与 B、Ga 含量关系图解中孔店—羊三木区域的样品点所反映的环境特征具有一致性。

3.2.3 V/(V+Ni)与 V/Cr 比值

通常认为 $V/(V+Ni) \geq 0.46$, $V/Cr \geq 2$ 代表还原环境,其中 $V/(V+Ni) \geq 0.54$, $V/Cr \geq 4.25$ 为强

还原环境,前人应用上述指标成功地解释了我国南方地区部分黑色泥岩的氧化—还原条件^[23-24]。

黄骅坳陷沙一下亚段无论是碳酸盐岩还是碎屑岩,其 $V/(V+Ni)$ 比值变化在 0.35~0.88 之间,大于 0.54 的样品约占 99%,显示出强还原环境的特点;而 V/Cr 比值则变化在 0.49~2.57 之间,所反映的环境指标与 $V/(V+Ni)$ 值不同,其原因是 Cr 与 Ni 一样,主要集中在基性岩石与热流体中,而沉积区多处见有基性岩的侵入与热流体的活动,导致 Cr 在沉积物中以类质同象置换的方式而富集,从而改变了 V 与 Cr 的比值关系。 $V/(V+Ni)$ 与 P 的相关分析结果,随着 P 含量的增加,表现出明显的强还原特征。而 $V/(V+Ni)$ 与 Zr 的相关分析结果,基本上平行分布,说明黄骅坳陷湖盆碳酸盐岩沉积期,湖盆的水体深度及氧化—还原条件处于相对稳定的状态(图 9)。

3.2.4 Th/U 比值

Th 和 U 的分布与沉积环境关系密切。一般而言,海相沉积物中 U 元素的丰度较高,而陆相沉积物中较低,Th 则相反。据此可利用 Th/U 比值作为判断沉积环境的标志。通常认为在海相暗色页岩与碳酸盐岩中最低, $Th/U < 2$; 在陆相页岩中最高, $Th/U > 6$; 海相灰绿色页岩介于二者之间, Th/U 为 2~6(亚当斯 J, 1965)。黄骅坳陷湖盆碳酸盐岩中共检测了 39 个样品,其中泥岩样品 13 个,碳酸盐岩样品 19 个,灰质砂岩样品 7 个,泥岩样品的 Th/U 值为 1.36~3.83,平均 2.58;碳酸盐岩样品(灰岩和白云岩)为 0.85~3.43,平均 2.2;灰质砂岩样品为 1.08~3.16,平均 2.03(表 1,3)。总体上 39 个样品中, $Th/U < 2$ 的样品约占 41%,低于 3 的样品约占 87%。由此显示出黄骅坳陷湖盆碳酸盐岩虽受陆源混入物影响较大,但 Th/U 比值较低,说明沉积环境处于还原环境,湖盆水体盐度较高或受到了入

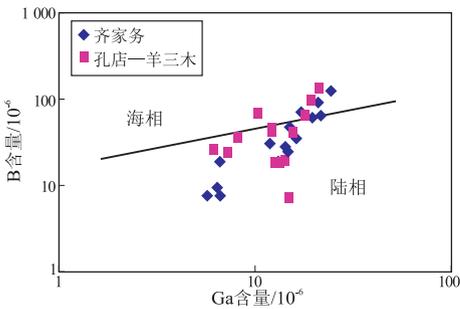


图 7 渤海湾盆地黄骅坳陷各地区 B 和 Ga 含量关系
Fig.7 Relationship between B and Ga contents in different areas in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

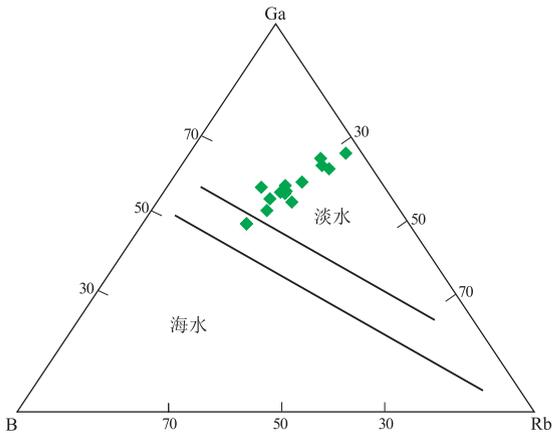


图 8 渤海湾盆地黄骅坳陷沙一下亚段样品 B、Ga、Rb 含量三角关系图
Fig.8 Relationship among B, Ga and Rb contents in samples from the lower part of the first member of Shahejie Formation in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

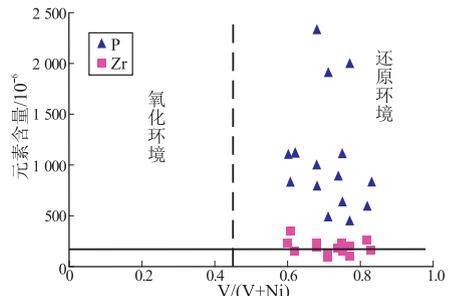


图 9 渤海湾盆地黄骅坳陷不同沉积环境元素 P、Zr 与 V/(V+Ni) 关系图解
Fig.9 Relationship between P, Zr contents and V/(V+Ni) ratio under different depositional environments in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

侵海水的影响。

4 结论

(1) 黄骅拗陷湖盆碳酸盐岩微量元素的含量及分布, 不仅在不同区带差异明显, 而且在不同岩类中变化较大, 但 Sr、Ba、Mn 等元素的含量在各区较为接近, 而 Ni、Pb、Zn 等元素的含量由齐家务向孔店—羊三木一带趋于减少, 反映了黄骅拗陷湖盆碳酸盐岩在沉积成岩过程中的水体深度、物质来源、盐度指数、古气候及氧化—还原条件的变化。Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 等微量元素, 在齐家务地区沙一下亚段各层不同岩类的含量普遍高于歧南与孔店—羊三木地区, 其原因除了齐家务一带湖盆环境相对闭塞、水循环受限、还原性较强外, 还与该区震裂塌陷、沉积物中的陆源基性组分与湖底深部沿断裂上升的热流体作用有关。

(2) 黄骅拗陷湖盆各类碳酸盐岩中 B 元素含量的分布, 反映出湖盆水体在沙一下亚段沉积期均具有咸化与淡化的交替过程。孔店—羊三木地区沙一下亚段各类样品中的 Ti 含量为 $(946 \sim 3\ 495) \times 10^{-6}$ 之间, 显示了近物源的特点。

(3) 黄骅地区由齐家务向歧南及孔店—羊三木地区, Sr/Ba 比值普遍由高降低, 这不仅反映了陆源物质的不断增多, 而且与水介质盐度的降低密切相关。该区沙一下亚段沉积期碳酸盐岩沉积水体经历了咸化与淡化的交替或事件性海侵的过程, 而 $V/(V+Ni)$ 比值为 0.35~0.88, 大于 0.54 的样品约占 99%, 显示出强还原环境的特点。另外, Th/U 比值较低, 说明沉积环境处于还原环境, 湖盆水体盐度较高或受到了入侵海水的影响。

参考文献:

[1] 吴伟涛, 高先志, 李理, 等. 渤海湾盆地大型潜山油气藏形成的有利因素[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 22-26.
Wu Weitao, Gao Xianzhi, Li Li, et al. Favorable conditions formed in large-scale buried-hill reservoir in Bohai Bay Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 22-26.

[2] 张服民, 简宗渝, 黄骅盆地早第三纪沉积史与环境特征[J]. 石油与天然气地质, 1981, 2(2): 141-157.
Zhang Fumin, Jian Zongyu. The sedimentation history and environmental characteristics of the Early Tertiary in Huanghua Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1981, 2(2): 141-157.

[3] 徐立恒, 陈践发, 李玲, 等. 普光气藏长兴—飞仙关组碳酸盐岩 C、O 同位素、微量元素分析及古环境意义[J]. 地球学报, 2009, 30(1): 103-110.
Xu Liheng, Chen Jianfa, Li Ling, et al. Carbon, Oxygen isotope and trace element characteristics of carbonate rocks in Changxin -

Feixianguan Formation of Puguang gas pool and its palaeoenvironment significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(1): 103-110.

- [4] 陈丽祥, 牛成民, 李慧勇, 等. 渤海湾盆地渤中 21-2 构造碳酸盐岩储层发育特征及其控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 16-21.
Chen Lixiang, Niu Chengmin, Li Huiyong, et al. Carbonate reservoir characteristics and its controlling factors in Bohong21-2 structure, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 16-21.
- [5] 李丽. 青东 5 块沙四段上亚段沉积类型及储层发育主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 62-66.
Li Li. Study on sedimentary type and main controlling factors of reservoir development in upper Es₄ submember of Qingdong5 Block [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 62-66.
- [6] 胡作维, 黄思静, 黄可可, 等. 四川东部华蓥山三叠系海相碳酸盐岩对海水信息的保存性评估[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1374-1380.
Hu Zuwei, Huang Sijing, Huang Keke, et al. Preservative evaluation of coeval seawater information for the Triassic marine carbonate rocks in the Huaying Mountain, eastern Sichuan [J]. Geology in China, 2010, 37(5): 1374-1380.
- [7] 黄成刚, 袁剑英, 田光荣, 等. 柴西地区始新统湖相白云岩储层地球化学特征及形成机理[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 230-242.
Huang Chenggang, Yuan Jianying, Tian Guangrong, et al. The geochemical characteristics and formation mechanism of the Eocene lacustrine dolomite reservoirs in the western Qaidam [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 230-242.
- [8] 刘江涛, 邓大伟, 廖东良, 等. 沾化凹陷沙四段上亚段滩坝沉积特征及其主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 42-46.
Liu Jiangtao, Deng Dawei, Liao Dongliang, et al. Sedimentary characteristics and main controlling factors of the upper fourth member of Shahejie Formation in Zhanhua depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 42-46.
- [9] 李晓光, 金科, 周艳. 雷家地区沙四段湖相碳酸盐岩油气藏特征分析[J]. 特种油气藏, 2016, 23(4): 25-28.
Li Xiaoguang, Jin Ke, Zhou Yan. Lacustrine carbonate reservoir properties of Sha4 in Leijia [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(4): 25-28.
- [10] Sweet A C, Soreghan G S, Sweet D E, et al. Permian dust in Oklahoma; Source and origin for Middle Permian (Flowerpot-Blaine) redbeds in Western Tropical Pangaea [J]. Sedimentary Geology, 2013, 284/285: 181-196.
- [11] Fralick P, Riding R. Steep Rock Lake: Sedimentology and geochemistry of an Archean carbonate platform [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 151: 132-175.
- [12] Ismail M H B, M' Rabat A. Evaporite, carbonate, and siliciclastic transitions in the Jurassic sequences of southeastern Tunisia [J]. Sedimentary Geology, 1990, 66(1/2): 65-82.
- [13] Purser B H, Soliman M, M' Rabat A. Carbonate, evaporite, siliciclastic transitions in Quaternary rift sediments of the northwestern Red

- Sea[J].Sedimentary Geology,1987,53(3/4):247-267.
- [14] 张晓龙,冀华丽,李媛姝,等.微量元素分析在南堡凹陷南部的应用[J].特种油气藏,2015,22(2):67-69.
Zhang Xiaolong, Ji Huali, Li Yuanzhu, et al. Application of analysis on trace elements in sedimentary environment, southern Nanpu Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 67-69.
- [15] 曾德铭,赵敏,石新,等.黄骅坳陷古近系沙一段下部湖相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J].新疆地质,2010,28(2):186-190.
Zeng Deming, Zhao Min, Shi Xin, et al. Characteristics and control factors of lacustrine carbonate reservoir in the lower part of the 1st member of Eocene Shahejie Formation in Huanghua Sag[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(2): 186-190.
- [16] 杨剑萍,晋同杰,姜超,等.歧口凹陷西南缘沙一下亚段碳酸盐岩沉积模式[J].新疆石油地质,2015,36(2):134-139.
Yang Jianping, Jin Tongjie, Jiang Chao, et al. Sedimentary model for lacustrine carbonate rocks in lower Sha-1 member of Shahejie Formation in southwestern margin of Qikou Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(2): 134-139.
- [17] 袁淑琴,周立宏,肖敦清,等.歧口凹陷南缘勘探潜力研究[J].石油天然气学报,2008,30(2):407-409.
Yuan Shuqin, Zhou Lihong, Xiao Dunqing, et al. Study on exploration potential in southern margin of Qikou Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2): 407-409.
- [18] 高胜利,王连敏,武玺,等.黄骅坳陷齐家务地区储层地球化学特征及其相关问题讨论[J].地质学报,2012,86(10):1688-1695.
Gao Shengli, Wang Lianmin, Wu Xi, et al. Geochemical characteristics and discussion on related problems of Sha 1 sub-member carbonate reservoirs in the Qijiawu area in Huanghua Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(10): 1688-1695.
- [19] 陈世悦,王玲,李聪,等.歧口凹陷古近系沙河街组一段下亚段湖盆咸化成因[J].石油学报,2012,33(1):40-47.
Chen Shiyue, Wang Ling, Li Cong, et al. The saline genesis of lacustrine basin in the lower section of the first member of Shahejie Formation in Qikou Sag[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(1): 40-47.
- [20] 龙华山,向才富,牛嘉玉,等.歧口凹陷滨海海断裂带热流体活动及其对油气成藏的影响[J].石油学报,2014,35(4):673-684.
Long Huashan, Xiang Caifu, Niu Jiayu, et al. Hydrothermal fluid flow and its influence on the hydrocarbon migration and accumulation along Binhai fault in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 35(4): 673-684.
- [21] 王益友,郭文莹,张国栋.几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J].同济大学学报,1979,(2):50-60.
Wang Yiyu, Guo Wenying, Zhang Guodong. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jintu Depression, Jiangsu Province[J]. Journal of Tongji University, 1979, (2): 50-60.
- [22] 张国栋,王惠中.中国东部早第三纪海侵和沉积环境:以苏北盆地为例[M].北京:地质出版社,1987.
Zhang G D, Wang H Z. The transgression and sedimentary environment of the Tertiary in eastern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [23] 颜佳新,徐四平,李方林.湖北巴东栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征[J].岩相古地理,1998,18(6):27-31.
Yan Jiaxin, Xu Siping, Li Fanglin, et al. Geochemistry of the dysaerobic sedimentary environments of the Qixia Formation in Badong, Hubei[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1998, 18(6): 27-31.
- [24] 吴朝东,杨承运,陈其英.湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义[J].岩石矿物学杂志,1999,18(1):26-39.
Wu Chao dong, Yang Chengyun, Chen Qiyong. The origin and geochemical characteristics of Upper Sinian-Lower Cambrian black shales in western Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(1): 26-39.

(编辑 徐文明)

(上接第848页)

- [28] 覃建雄,曾允孚,杨俊杰.鄂尔多斯盆地东部下奥陶统白云岩成因及储集特征[J].石油与天然气地质,1994,15(4):275-284.
Qin Jianxiong, Zeng Yunfu, Yang Junjie. Origin of lower Ordovician dolomite in eastern Ordos Basin and its reservoir properties[J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(4): 275-284.
- [29] 刘燕,付金华,李建明.鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组白云岩成因机理分析[J].石油天然气学报,2011,33(11):46-50.
Liu Yan, Fu Jinhua, Li Jianming. Dolomite genetic analysis on Ordovician Majiagou Formation in eastern Ordos Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(11): 46-50.
- [30] 刘宝宪,王红伟,马占荣,等.鄂尔多斯盆地东南部宜川—黄龙地区马五段白云岩次生灰化作用特征与成因分析[J].天然气地球科学,2011,22(5):789-795.
Liu Baoxian, Wang Hongwei, Ma Zhanrong, et al. Secondary limestone action on Ma5 member dolomites in Yichuan-Huanglong region of southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 789-795.
- [31] 苏中堂,张丽雯,李婧娟,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组白云岩包裹体特征及其他地质意义[J].矿物岩石地球化学通报,2017,36(5):843-849.
Su Zhongtang, Zhang Liwen, Li Jingjuan, et al. Characteristics of fluid inclusions in dolomite of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin and their geological significances[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(5): 843-849.

(编辑 徐文明)