

鄂尔多斯盆地西南部王全口组碳酸盐岩层系 沉积环境及其构造背景

宋立军^{1,2}, 刘池阳^{2,3}, 李光祥¹, 赵红格^{2,3}, 王建强^{2,3}, 张小龙^{2,3}, 王宇平^{2,3}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 3. 西北大学 地质系, 陕西 西安 710069)

摘要:鄂尔多斯盆地西南部沉积了一套巨厚的以王全口组为代表的中元古代碳酸盐岩层系。为预测其油气勘探前景,文章采用主、微量元素地球化学方法,探讨王全口组的岩石特征、沉积环境、构造背景及其内硅质岩的成因。结果表明,王全口组以白云岩、硅质白云岩和硅质岩为主,并含有少量石英砂岩。其中,硅质岩和硅质白云岩内硅质为生物化学成因,且几乎未遭受到陆源碎屑物质影响。 V/Cr 、 Ni/Co 、 $V/(V+Ni)$ 和 Ce/La 氧化还原环境判别图显示,王全口组整体形成于富氧或贫氧过渡状态下的浅水沉积环境。古水温数据与 Sr/Cu 比值反映的结果一致,即王全口组沉积期区域古水温相对最高,应为干燥炎热的气候背景。 Sr/Ba 、 $CaO/(CaO+MgO)$ 海陆环境判别图、 Y 异常和 $(La/Nd)_{pass}$ 值表明,除砂岩样品外,王全口组碳酸盐岩整体形成于海相咸水环境或次咸水过渡沉积环境。综合 $La-Th-Sc$ 、 $Th-Co-Zr/10$ 和 $100Eu/\sum REE-LREE/HREE$ 图解,王全口组碳酸盐岩样品具有大陆岛弧,活动陆缘和陆壳-浅海沉积体系特征,且陇县固关、炭山和盆缘桌子山地区样品同样具有高稀土含量特征,进一步表明王全口组研究区应具有大陆岛弧弧后拗陷构造背景特征。总而言之,在陆缘弧后拗陷背景和干热气候、弱氧化的浅水海陆过渡环境下,区域发育了生物化学成因的碳酸盐岩与硅质岩。

关键词:沉积环境;构造背景;碳酸盐岩;王全口组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary environment and tectonic backgrounds of the Wangquankou Formation carbonate rock sequences in southwestern Ordos Basin

Song Lijun^{1,2}, Liu Chiyang^{2,3}, Li Guangxiang¹, Zhao Hongge^{2,3}, Wang Jianqiang^{2,3}, Zhang Xiaolong^{2,3}, Wang Yuping^{2,3}

(1. Geosciences and Engineering Faculty, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: A very thick Middle Proterozoic carbonate strata represented by the Wangquankou Formation is distributed in the southwestern Ordos basin. In order to forecast its petroleum exploration prospects, major and trace elements were measured on samples to reveal the rock characteristics, sedimentary environment, tectonic settings and origin of siliceous rocks of the Wangquankou Formation. The Wangquankou Formation mainly consists of dolomites, siliceous dolomites and silicalites, with minor quartz sandstones. Geochemical features of siliceous materials in silicalites and siliceous dolomites clearly show a biochemical origin, with almost no influences from epicontinental clastic input. Discrimination diagrams of redox environment, such as V/Cr , Ni/Co , $V/(V+Ni)$ and Ce/La , indicate that the Wangquankou Formation was deposited in aerobic or transitional dysaerobic shallow water. Paleo-temperature data, in good agreement with Sr/Cu values, suggest that regional temperatures were highest during deposition of the Wangquankou Formation, further indicating an arid and scorching climate background. Sr/Ba and $CaO/(CaO+MgO)$ environment discriminant graphs, Y abnormality and $(La/Nd)_{pass}$ ratio show that the carbonate rocks formed in marine saltwater or transitional semi-saltwater environment. A comprehensive analysis of various diagrams, such as $La-Th-Sc$, $Th-Co-Zr/10$ and $100Eu/\sum REE-LREE/HREE$ graphs, indicates that carbonate samples from the Wangquankou Formation carry information of active continental margin, conti-

收稿日期:2015-10-23;修订日期:2016-01-20。

第一作者简介:宋立军(1977—),男,副教授,盆地分析与构造地质。E-mail:slj2003150@126.com。

通信作者简介:刘池阳(1953—),教授、博士生导师,盆地动力学、构造地质学、油气地质与勘探。E-mail:ley@nwnu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41102072);陕西省自然科学基金项目(2013JM5006);大陆动力学国家重点实验室联合重点课题(J081334);构造地质与油气资源教育部重点实验室基金项目(TPR-2012-20);中国地质调查局基础地质调查项目(12120113039900)。

mental island arc and middle continent-shallow water sedimentary system. Samples from regions of Long Country Guguan, Tanshan, and Zhuozishan located at the basin margin are all characterized by high REEs, indicating a tectonic background of continental back-arc depression during the Wangquankou Stage. In conclusion, siliceous rocks and carbonate rocks of biochemical origin in this region were deposited in mild-oxidizing, marine-continental transition environment, with the backgrounds of desiccation and torridness with the tectonic settings of epicontinental back-arc depression.

Key words: sedimentary environment, tectonic setting, carbonate rock, Wangquankou Formation, Ordos Basin

随着鄂尔多斯盆地天然气开发的深入进行,寻找新层系、拓展新领域已经日益成为当前鄂尔多斯盆地天然气勘探开发的一项迫切任务。鄂尔多斯盆地西南部前寒武系碳酸盐岩古油藏沥青的发现^[1],使人们认识到该地区分布稳定的前寒武系碳酸盐岩作为潜在烃源岩,可能具有重要的勘探潜力,并日益受到决策层关注^[2]。鄂尔多斯盆地西南部的前寒武系碳酸盐岩在宁夏境内被称为王全口组,在陕甘交界地区被人称为蓆县系洛南群。地震剖面显示两套地层沉积连续,为同一套地层,应属同时代产物。在文中将其统称为王全口组。

近年来,诸多学者对王全口组分布^[3]、陇县固关和镇原地区王全口组沉积环境^[4-5]以及王全口组生烃潜力^[4,6]进行了一些探讨,取得了一些进展,并认识到王全口组白云岩厚度较大,其内有机质类型好,会对区域油气有一定贡献^[4-6]。但长期以来,对其内白云岩成因、沉积环境,尤其是构造沉积背景一直缺乏整体性和系统性分析,以致对其构造背景有裂谷型大陆边缘^[3]、陆间压陷^[7]和裂谷(小洋盆)构造组合^[8]等多种认识。

在野外实地勘查的基础上,从元素地球化学分析入手,利用王全口组碳酸盐岩样品的地化特征来判断其岩石成岩、沉积环境、构造沉积背景,以期为进一步拓宽鄂尔多斯盆地西南部天然气勘探提供依据。

1 区域地质特征

鄂尔多斯盆地西南部地处华北板块西南缘中段,南与祁连—秦岭造山带相邻,现今构造位置为鄂尔多斯西缘逆冲带东侧、渭北隆起和伊陕斜坡西段、天环坳陷中南部(图1a,b)。

鄂尔多斯盆地西南部沉积了一套巨厚的以王全口组为代表的中元古代碳酸盐岩层系。该组层系主要分布在陕西甘肃交界地区和宁夏地区境内,上述两地区的陇县和韦州坳陷中央部位该组地层残留厚度较大,平均800 m,最大厚度可达1 000 m(图1c)。其中,陕西甘肃交界地区的王全口组(原称蓆县系)野外露头零星分布,在陕西陇县、平凉二道沟、山口子、崇信县铜城、华亭县保家山等地均有出露,其以条带状硅质白云岩、纹层状叠层石云岩、泥晶藻云岩为主,在香1井,镇

探1井,灵1井,龙1井,龙2井中也均有钻遇;宁夏地区境内的王全口组在宁夏北部的贺兰山出露较多,在内蒙古桌子山一带和宁东地区的青龙山、炭山一带也有出露,尤以青龙山地区出露较好。在青龙山,王全口组为一套含叠层石白云岩为主的潮坪相碳酸盐岩沉积,其与下伏黄旗口组整合接触,上被震旦系正目关组冰碛砾岩或侏罗系角度不整合覆盖。

王全口组主要由潮坪相碳酸盐岩和少量扇三角洲相砂砾岩组成,整体以白云岩或硅质白云岩为主,其内发育 *Conophyton*, *Jacutophyton*, *Tielingella*, *Colonnella* 等叠层石组合,其中潮坪相碳酸盐岩主要由潮上亚相泥质白云岩、潮间亚相燧石条带白云岩、叠层石白云岩和灰绿色粉砂岩、潮道亚相灰绿色砂岩及潮下亚相浅灰色泥岩组成,如岐山、马峡、青龙山等地区(图1c);扇三角洲相主要由扇根亚相紫红色砾岩和扇根—扇端亚相紫红色砂砾岩组成,如桌子山地区(图1c)。

2 岩石地球化学特征

2.1 样品采集及测试

王全口组白云岩样品采自鄂尔多斯盆地西南缘野外露头,样品从南至北均有分布,具有较好的代表性(图1)。样品的主量、微量元素分析测试在澳实分析检测(广州)有限公司矿物实验室完成。其中,主量元素由X射线荧光光谱分析(ME-XRF26)测试完成,其准确度与精密密度优于1%,稀土元素和微量元素分别由电感耦合等离子体质谱仪(ME-MS81和ME-MS61)完成,其分析精度和准确度优于5%。

2.2 岩石地球化学特征

王全口组碳酸盐岩层系岩性稳定,以白云岩、硅质白云岩为主,并含有少量硅质岩和石英砂岩。硅质岩多呈透镜状或夹层状赋存于白云岩中,少量与白云岩呈互层状产出。王全口组白云岩、硅质白云岩及硅质岩等各类岩石的钙/镁比值分别为1.41~1.82(均值1.48,样品数 $n=15$),1.41~1.59(均值1.47, $n=6$),1.39~1.52(均值1.46, $n=2$),均与纯白云岩钙/镁比值($\text{CaO}=30.4\%$, $\text{MgO}=21.8\%$, $\text{CaO}/\text{MgO}=1.39$)接近(表1),表明王全口组白云岩中方解

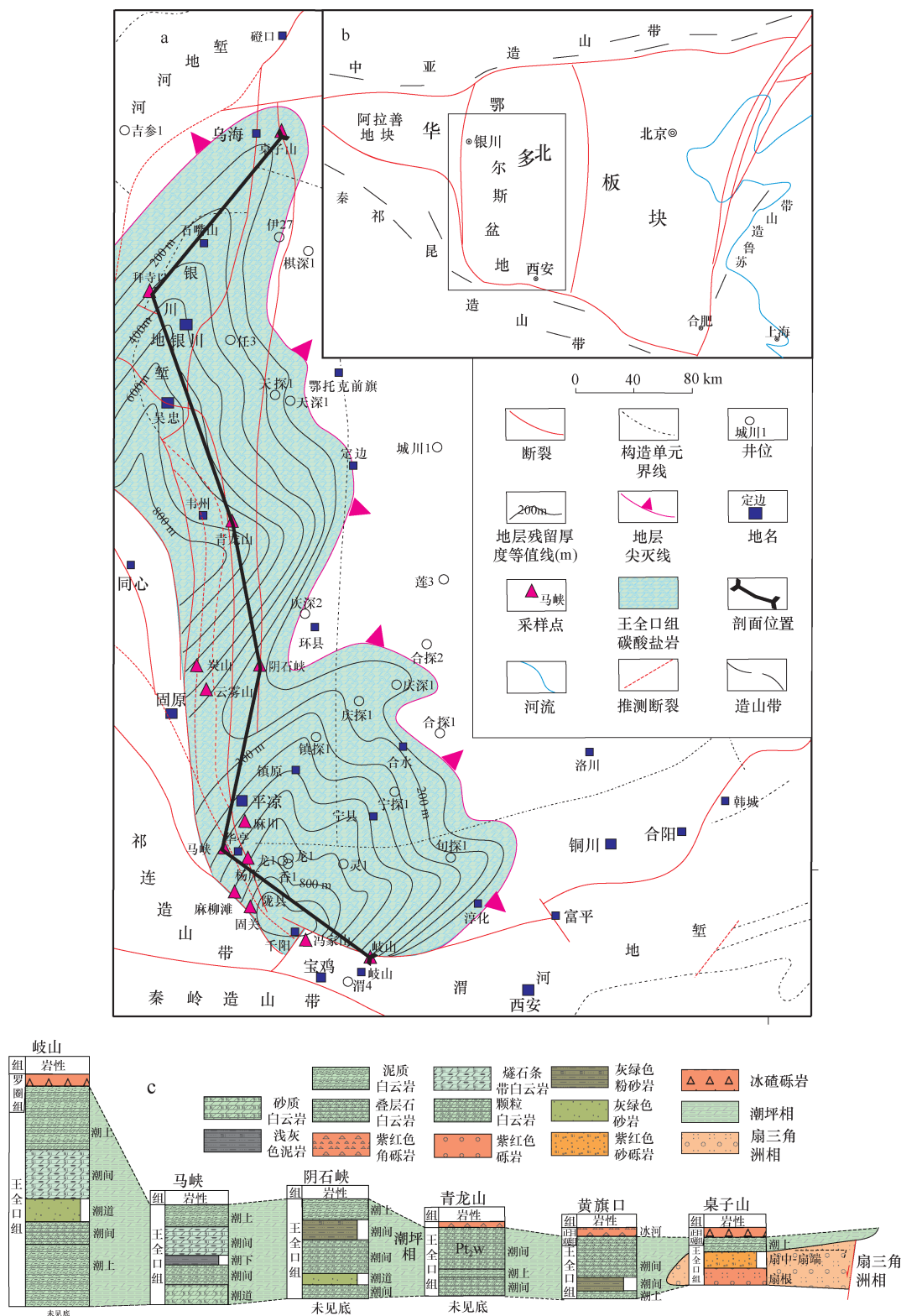


图1 鄂尔多斯盆地王全口组厚度及沉积相剖面

Fig.1 Strata thickness and sedimentary facies of the Wangquankou Formation, Ordos Basin

a. 王全口组厚度分布; b. 研究区构造位置; c. 王全口组沉积剖面

石含量非常少,整体以白云石为主。王全口组白云岩主量元素以 CaO (27.85% ~ 31.90%, 平均值 30.46%) 和 MgO ($\text{MgO} = 8.71\% \sim 22.08\%$, 平均值 19.94%) 为主, SiO_2 (0.02% ~ 8.96%, 平均值 2.56%)、 Al_2O_3 (0.01% ~ 0.98%, 平均值 0.30%), TiO_2 (0 ~ 0.2%, 平均值

0.04%) 和 Fe_2O_3 (0.07% ~ 2.24%, 平均值 0.57%) 含量均较低, $\text{SiO}_2/(\text{CaO} + \text{MgO})$ 极低 (0 ~ 0.19, 平均值 0.05), 表明其沉积时基本不受陆源碎屑物质影响, 应为化学成因产物。王全口组硅质白云岩样品的 CaO (17% ~ 25.52%, 平均值 21.98%) 和 MgO (11.75% ~

表1 鄂尔多斯盆地王全口组样品主量元素分析结果
Table 1 Major elements of samples from the Wangquankou Formation, Ordos Basin

样号	地点	岩性	主量元素含量/%												CaO/ MgO	MgO/ (100 * Al ₂ O ₃)	SiO ₂ / (CaO + MgO)	K ₂ O/ Na ₂ O
			Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	LOI				
QS-03	岐山	白云岩	0.04	30.30	<0.01	0.07	0.01	21.00	0.01	0.07	0.01	3.85	<0.01	43.93	1.44	5.25	0.08	0.14
QS-04	岐山		0.14	30.60	<0.01	0.18	0.04	20.80	0.02	0.08	0.01	2.15	<0.01	45.10	1.47	1.49	0.04	0.50
QY-04	冯家山		0.24	31.60	<0.01	0.09	0.07	20.50	0.01	0.09	0.01	0.59	<0.01	45.90	1.54	0.85	0.01	0.78
HT-01	马峡		0.12	31.00	<0.01	0.23	0.03	21.40	0.02	0.08	0.02	1.14	<0.01	45.51	1.45	1.78	0.02	0.38
HT-04	杨庄		0.59	29.20	<0.01	0.70	0.33	19.55	0.13	0.09	0.03	5.21	0.04	44.22	1.49	0.33	0.11	3.67
GY-01	云雾山		0.05	31.00	<0.01	0.26	0.03	21.3	0.02	0.08	0.01	0.37	<0.01	45.84	1.46	4.26	0.01	0.38
TS-06	炭山		0.57	29.30	<0.01	0.78	0.42	20.1	0.04	0.09	0.02	3.00	0.03	44.97	1.46	0.35	0.06	4.67
ZZ-02	桌子山		0.36	31.90	<0.01	2.24	0.16	17.55	0.22	0.08	0.02	2.24	0.04	45.02	1.82	0.49	0.05	2.00
JX-1	固关 ^①	硅质白云岩	0.98	28.51	0.69		0.21	20.09	0.08	0.06	0.06	4.95	0.20	43.71	1.42	0.21	0.10	3.50
JX-2	固关 ^①		0.09	30.70	0.29		0.02	21.78	0.02	0.06	0.01	0.54	<0.01	45.99	1.41	2.42	0.01	0.33
JX-4	固关 ^①		0.01	31.44	0.25		<0.01	21.99	0.01	0.04	0.01	0.77	<0.01	45.00	1.43	21.99	0.01	0.25
JX-5	固关 ^①		0.68	27.85	0.51		0.03	19.31	0.08	0.06	0.02	8.96	0.06	42.00	1.44	0.28	0.19	0.50
JX-6	固关 ^①		0.52	30.44	0.34		0.05	20.96	0.06	0.06	0.03	1.98	0.07	45.07	1.45	0.40	0.04	0.83
JX-7	固关 ^①		0.03	31.55	0.08		<0.01	22.08	0.02	0.05	0.01	0.02	<0.01	45.75	1.43	7.36	0	0.20
JX-8	固关 ^①		0.03	31.49	0.08		<0.01	21.98	0.02	0.05	0.01	0.02	<0.01	45.82	1.43	7.33	0	0.20
HT-02	马峡		1.60	19.50	<0.01	0.62	0.30	13.05	0.01	0.07	0.02	34.10	0.05	29.97	1.49	0.08	1.05	4.29
TX-01	青龙山	砂岩	0.08	24.80	<0.01	0.18	0.02	17.10	0.01	0.07	0.01	20.90	<0.01	36.29	1.45	2.14	0.50	0.29
JX-3	固关 ^①		0.48	25.52	0.46		0.12	18.07	0.04	0.06	0.02	15.50	0.04	39.29	1.41	0.38	0.36	2.00
QS-01	岐山		0.07	26.10	<0.01	0.17	<0.01	17.95	0.02	0.08	0.01	17.00	<0.01	38.22	1.45	2.56	0.39	0.13
PL-01	平凉		0.03	17.00	<0.01	0.23	<0.01	11.75	0.01	0.05	0.01	45.40	<0.01	24.93	1.45	3.92	1.58	0.20
LX-02	麻柳滩		1.23	18.95	<0.01	0.77	0.32	11.95	0.02	0.05	0.02	38.10	<0.03	28.20	1.59	0.10	1.23	6.40
ZZ-01	桌子山		0.98	0.55	<0.01	0.70	0.58	0.16	<0.01	<0.01	0.02	95.70	0.11	0.74	3.44	0.58	134.79	>58
HT-03	马峡		0.07	9.07	<0.01	0.32	0.01	5.95	0.01	0.03	0.01	70.70	<0.01	13.53	1.52	0.85	4.71	0.33
QS-02	岐山		0.08	5.15	<0.01	0.33	0.02	3.70	0.01	0.02	0.01	82.30	<0.01	7.96	1.39	0.46	9.30	1.00
	热水成因硅质岩 ^②	硅质岩	1.41	0.11		2.67	0.42	0.33	0.80	0.16	0.03	92.63	0.09		0.33	0.002 3	210.52	2.63
	热水成因硅质岩 ^②		1.99	1.33		2.12	0.42	0.95	0.78	0.41	0.11	92.80	0.08		1.40	0.004 8	40.70	1.02
	生物成因硅质岩 ^③		0.71	0.30		0.43	0.05	0.02	0.22	0.06	0.02	95.96	0.03	2.93	15.00	0.000 3	299.88	0.83
	生物成因硅质岩 ^④		0.84	5.07		1.59	0.16	0.19	0.30	0.18	0.03	88.08	0.016	0.34	26.68	0.002 3	16.75	0.89
	火山成因硅质岩 ^⑤		5.85	2.82		0.82	1.05	1.15		1.18		79.91	0.46		2.45	0.002 0	20.13	0.89
火山-生物成因硅质岩 ^⑤			3.74	1.00		1.35	0.53	1.26		0.51		85.74	0.20		0.79	0.003 4	37.94	1.04

注:①数据来自文献[4];②引自文献[10];③引自文献[12]数据平均;④引自文献[13];⑤引自文献[11]。LOI为烧失量,%。

18.07%,平均值14.98%)含量较为稳定,而SiO₂(SiO₂=15.50%~45.4%,平均值28.50)含量较高、且变化较大,而Al₂O₃(0.07%~1.60%,平均值0.58%)、TiO₂(0~0.05%,平均值0.03%)含量极低,表明沉积时基本不受陆源物质影响。王全口组硅质岩样品SiO₂含量较高(SiO₂=70.7%~80.2%,n=2,平均值76.50%),CaO(5.15%~9.07%,平均值7.11%)和MgO(3.70%~5.95%,平均值4.83%)含量较低,Al₂O₃(0.07%~0.08%,平均值0.08%)、TiO₂(<0.01%)含量均小于1%,同样显示其沉积时基本不受陆源物质影响。

王全口组样品中微量元素值(表2)同碳酸盐岩平均微量元素丰度基本一致,V/Cr为0.09~6.00,平均值为1.62(n=23),Ni/Co为0.34~5.50,平均值为

2.19(n=23),V/(V+Ni)为0.37~0.91,平均值为0.65(n=23),Sr/Ba为0.11~12.00,平均值为2.77(n=23)。其中白云岩和硅质白云岩样品Sr/Cu为0.19~70.59,平均值为18.07(n=15),Al/(Al+Fe+Mn)为0.10~0.66,平均值为0.32(n=15),Mn/Sr为0.43~15.31,平均值为3.70(n=20)。

王全口组样品中稀土元素总量为(2.04~23.80)×10⁻⁶,平均值为7.99×10⁻⁶(表3),同塔里木盆地白云岩稀土含量基本一致^[9],稀土元素总量均较低。轻稀土和重稀土比值(LREE/HREE)为5.04~11.23,平均值为8.56,La/Yb比值介于8.14~32.50,平均值为17.53,两者均显示王全口组样品轻重稀土分异作用均较强,La/Sm比值介于3.02~26.67,平均值为12.52,Gd/Yb比值介于1.25~3.67,平均值为2.40,两者则

表2 鄂尔多斯盆地王全口组样品微量元素分析结果
Table 2 Trace element contents of samples from the Wangquankou Formation, Ordos Basin

样号	地点	岩性	微量元素含量/10 ⁻⁶										V/ (V + Ni)	Sr/Cu	Sr/Ba	Al/(Al + Fe + Mn)	T/℃	Mn/Sr				
			As	Ba	Bi	Co	Cr	Cu	Ga	Mo	Ni	Sb							Sr	V		
QS -03	岐山	白 云 岩	<0.2	10.00	<0.01	0.30	2.00	1.80	0.12	0.17	0.40	0.05	17.60	4.00	2.00	1.33	0.91	9.78	1.76	0.24	31.69	2.27
QS -04	岐山		0.50	60.00	<0.01	0.60	2.00	1.30	0.27	0.13	1.30	0.05	58.70	8.00	4.00	2.17	0.86	45.15	0.98	0.32	31.18	1.55
QY -04	冯家山		0.70	10.00	<0.01	0.60	3.00	1.70	0.47	0.48	2.30	0.11	120.0	7.00	2.33	3.83	0.75	70.59	12.00	0.62	30.42	0.43
HT -01	马峡		1.20	10.00	<0.01	0.50	2.00	2.90	0.25	0.46	0.80	0.10	39.30	2.00	1.00	1.60	0.71	13.55	3.93	0.28	31.42	3.64
HT -04	杨庄		4.00	30.00	<0.01	0.70	4.00	2.10	1.00	0.31	1.50	0.05	61.60	5.00	1.25	2.14	0.77	29.33	2.05	0.36	31.14	15.31
GY -01	云雾山		1.60	20.00	<0.01	0.30	1.00	0.80	0.15	0.18	0.50	0.08	19.30	2.00	2.00	1.67	0.80	24.13	0.97	0.14	31.67	3.58
TS -06	炭山		5.40	170.00	<0.01	1.30	2.00	11.00	1.10	0.31	2.20	0.13	61.80	12.00	6.00	1.69	0.85	5.62	0.36	0.36	31.14	4.55
ZZ -02	桌子山		19.90	50.00	<0.01	2.90	6.00	12.70	0.69	0.64	6.80	0.40	188.50	26.00	4.33	2.34	0.79	14.84	3.77	0.11	29.57	8.17
JX -1	固关 ^①		88.41				8.68	16.86			8.38		260.82	21.59	1.28	0.97	0.72		2.95		28.68	2.38
JX -2	固关 ^①		8.47				5.17	2.98			5.10		54.65	8.93	3.00	0.99	0.64		6.45		31.23	2.83
JX -4	固关 ^①	5.19				6.82	2.00			5.32		42.57	3.11	1.56	0.78	0.37		8.20		31.38	1.82	
JX -5	固关 ^①	110.50				13.08	37.56			19.13		89.80	11.67	0.31	1.46	0.38		0.81		30.79	6.90	
JX -6	固关 ^①	70.57				6.08	18.06			12.84		131.01	8.12	0.45	2.11	0.39		1.86		30.28	3.55	
JX -7	固关 ^①	22.54				6.71	1.65			4.07		54.11	3.13	1.90	0.61	0.43		2.40		31.24	2.86	
JX -8	固关 ^①	22.16				6.74	1.77			4.15		52.86	3.24	1.83	0.62	0.44		2.39		31.25	2.93	
ZZ -01	桌子山	砂岩	1.30	60.00	0.06	1.10	24.00	2.70	0.98	0.93	2.80	0.08	11.40	7.00	0.29	2.55	0.71	0.19	3.39	0.52	31.76	
LX -02	麻柳滩	硅 质 白 云 岩	13.10	60.00	<0.01	1.30	9.00	7.90	2.09	1.23	4.90	0.23	53.90	11.00	1.22	3.77	0.69	6.82	0.90	0.54	31.24	2.56
JX3	固关 ^①		38.24	<0.01	19.65	17.55					6.64		66.96	8.36	0.48	0.34	0.56		1.75		31.08	4.63
TX -01	青龙山		0.20	10.00		0.50	19.00	1.50	0.22	1.44	1.30	0.07	24.80	2.00	0.11	2.60	0.61	16.53	2.48	0.24	31.60	1.81
PL -01	麻川		<0.20	230.00	<0.01	0.30	22.00	1.40	0.20	1.60	1.20	0.12	24.20	2.00	0.09	4.00	0.63	17.29	0.11	0.10	31.61	1.57
HT -02	马峡		5.50	40.00	<0.01	1.00	8.00	7.30	2.33	1.05	3.90	0.13	97.60	13.00	1.63	3.90	0.77	13.37	2.44	0.66	30.70	0.57
HT -03	马峡	硅质岩	3.80	10.00	<0.01	0.40	20.00	4.30	0.23	1.73	1.40	0.10	10.60	2.00	0.10	3.50	0.59	2.47	1.06	0.14	31.77	
QS -02	岐山		0.40	10.00	<0.01	0.20	24.00	4.80	0.23	1.76	1.10	0.06	6.40	1.00	0.04	5.50	0.48	1.33	0.64	0.15	31.83	
碳酸盐岩 ^②			1.00	10.00	3.00	0.10	11.00	4.00	4.00	0.40	20.00	0.20	610.00	20.00	1.82	200.00	0.50	152.50	61.00			

注:①数据来自文献[4];②数据来自文献[20].

表 3 鄂尔多斯盆地王全口组样品稀土元素分析结果
Table 3 REEs of content of samples from the Wangquankou Formation, Ordos Basin

样号	地点	岩性	元素含量/10 ⁻⁶														Ce/La		La/La _N		La/La _N		Gd/La		LREE/HREE				
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	δCe	δEu	ΣREE	La _N	Yb _N	La	Yb	Sm	Yb	LREE	HREE	
QS-01	岐山	白云岩	0.60	1.10	0.11	0.40	0.04	0.03	0.05	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.03	0.01	0.50	0.18	0.15	3.00	1.94	0.14	1.83	20.00	15.00	1.67	2.28	0.72	3.17
QS-02	岐山		0.50	0.90	0.10	0.50	0.07	0.03	0.06	0.01	0.06	0.01	0.05	0.01	0.03	0.01	0.50	0.15	0.18	2.84	1.61	0.14	1.80	16.67	7.14	2.00	2.10	0.74	2.84
QS-03	岐山		0.50	0.90	0.07	0.30	0.03	0.03	0.05	0.01	0.05	0.01	0.03	0.01	0.04	0.01	0.50	0.14	0.15	2.54	1.61	0.19	1.80	12.50	16.67	1.25	1.83	0.71	2.58
QS-04	岐山		1.30	2.20	0.20	0.70	0.06	0.03	0.11	0.02	0.12	0.02	0.07	0.01	0.04	0.01	0.80	0.34	0.17	5.69	4.19	0.19	1.69	32.50	21.67	2.75	4.49	1.20	3.74
HT-01	马峡		1.20	2.40	0.28	0.90	0.14	0.03	0.15	0.03	0.12	0.02	0.07	0.01	0.07	0.01	0.70	0.53	0.13	6.13	3.87	0.33	2.00	17.14	8.57	2.14	4.95	1.18	4.19
HT-03	马峡		0.80	1.20	0.15	0.50	0.05	0.03	0.11	0.02	0.09	0.03	0.07	0.02	0.03	0.01	0.70	0.21	0.15	3.81	2.58	0.14	1.50	26.67	16.00	3.67	2.73	1.08	2.53
HT-04	杨庄		3.30	5.80	0.71	2.80	0.55	0.12	0.50	0.07	0.48	0.10	0.29	0.05	0.28	0.03	3.20	1.29	0.84	18.28	10.65	1.34	1.76	11.79	6.00	1.79	13.28	5.00	2.66
GY-01	云雾山		0.80	1.60	0.15	0.60	0.03	0.03	0.11	0.01	0.07	0.02	0.04	0.01	0.04	0.01	0.50	0.18	0.26	4.02	2.58	0.19	2.00	20.00	26.67	2.75	3.21	0.81	3.96
TS-06	炭山	白云岩	4.00	9.70	1.12	4.30	0.81	0.11	0.78	0.11	0.60	0.11	0.31	0.05	0.26	0.04	3.10	2.15	0.68	25.40	12.90	1.24	2.43	15.38	4.94	3.00	20.04	5.36	3.74
ZZ-02	桌子山		3.50	8.90	1.13	4.90	1.16	0.27	1.30	0.21	1.02	0.21	0.64	0.07	0.43	0.06	6.60	2.08	1.48	30.40	11.29	2.06	2.54	8.14	3.02	3.02	19.86	10.54	1.88
JX-1	固关 ^①		6.12	13.11	1.44	5.70	1.11	0.31	1.13	0.17	0.99	0.2	0.56	0.08	0.50	0.08	6.31	2.91	1.93	37.81	19.74	2.39	2.14	12.24	5.51	2.26	27.79	10.02	2.77
JX-2	固关 ^①		1.05	1.95	0.22	0.83	0.16	0.04	0.15	0.02	0.14	0.03	0.07	0.01	0.06	0.01	1.06	0.44	0.29	5.80	3.39	0.29	1.86	17.50	6.56	2.50	4.25	1.55	2.74
JX-4	固关 ^①		0.73	1.52	0.16	0.58	0.10	0.03	0.09	0.01	0.07	0.01	0.04	0.01	0.03	0	0.52	0.33	0.24	3.90	2.35	0.14	2.08	24.33	7.30	3.00	3.12	0.78	4.00
JX-5	固关 ^①		6.31	10.72	1.46	5.85	1.19	0.31	1.27	0.19	1.23	0.26	0.74	0.11	0.71	0.10	8.12	2.42	2.04	38.57	20.35	3.40	1.70	8.89	5.30	1.79	25.84	12.73	2.03
JX-6	固关 ^①		2.46	4.94	0.57	2.20	0.41	0.13	0.42	0.06	0.38	0.08	0.22	0.03	0.20	0.03	2.66	1.09	0.87	14.79	7.94	0.96	2.01	12.30	6.00	2.10	10.71	4.08	2.63
JX-7	固关 ^①		0.50	0.60	0.08	0.31	0.07	0.02	0.07	0.01	0.07	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.50	0.14	0.14	2.34	1.61	0.19	1.20	12.50	7.14	1.75	1.58	0.76	2.08
JX-8	固关 ^①	0.48	0.58	0.08	0.31	0.07	0.02	0.07	0.01	0.07	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.50	0.14	0.14	2.30	1.55	0.19	1.21	12.00	6.86	1.75	1.54	0.76	2.03	
Jx3	固关 ^①	硅质白云岩	3.85	7.06	0.98	3.91	0.83	0.21	0.89	0.13	0.85	0.18	0.52	0.08	0.49	0.07	5.70	1.63	1.41	25.75	12.42	2.34	1.83	7.86	4.64	1.82	16.84	8.91	1.89
TX-01	青龙山	云岩	0.60	1.20	0.15	0.40	0.05	0.03	0.12	0.02	0.10	0.02	0.08	0.01	0.05	0.01	0.90	0.26	0.16	3.74	1.94	0.24	2.00	12.00	12.00	2.40	2.43	1.31	1.85
HT-03	马峡	PASS ^②	38.20	79.60	8.83	33.9	5.55	1.08	4.66	0.77	4.68	0.99	2.85	0.41	2.82	0.43	27.00	16.44	6.52	211.77	123.23	13.49	2.08	13.55	6.88	1.65	167.16	44.61	3.75

注:①数据来自文献[4];②数据来自文献[20]。

均显示轻稀土和重稀土元素中靠前的元素均较靠后元素富集。

3 硅质及硅质岩成因

硅质岩成因类型的判别对确定王全口组碳酸盐岩成因、沉积环境及其构造背景具有重要意义。然而,硅质岩的成因类型较多,大致有生物或生物化学沉积成因、火山沉积成因、热水沉积成因、热液交代(硅化)成因等成因类型。王全口组硅质岩或白云质硅质岩与典型热水成因^[10]、火山成因或火山-生物成因的硅质岩^[11]相比, SiO_2 含量差距较大, CaO/MgO 比值则相近, SiO_2 含量与生物成因硅质岩^[12-13] SiO_2 含量相近,但 CaO/MgO 比值则差距较大。

一般认为硅质岩中 Fe、Mn 的富集主要与热液的参与有关^[10,14],而 Al、Ti 的富集则主要与陆源物质的输入有关^[15]。一般海相热水沉积的 $\text{Fe}/\text{Ti} > 20$, $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti} > 20 \pm 5$, $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn}) < 0.35$ ^[16]。正常环境中的沉积物, $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 比值约为 0.6,而与热水作用有关的沉积物的 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 比值小很多,纯热水的 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 比值约 0.01^[17],如位于东太平洋洋隆热液沉积物 $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 值多在 0.1~0.2。此外,As, Sb, Bi, Ga 和 U 等元素含量较高是热水沉积的重要特点,热水沉积物富集 As (200×10^{-6}) 和 Sb (7×10^{-6}) 等元素,远高于现代远洋沉积物 As (10×10^{-6}), Sb ($2 - 3 \times 10^{-6}$) 的含量^[18]。热泉(水)沉积岩 U/Th 比值一般大于 1^[19],然而由于受 Th 元素放射性衰变减少,对于古老的沉积岩而言,利用 U/Th 比值来判别热水成因特征,可信度较差。此外,Mo 是生物必需微量元素,它参与许多酶的合成和促进酶的活性,生物成因硅质岩 Mo 含量较高。

因硅质岩样品较少,考虑到白云质硅质白云岩和硅质岩中硅质具有相同成因,为更合理判别硅质岩成因,研究将白云质硅质岩和硅质岩测试数据一起,并结合邓昆在该区镇探 1 井王全口组(原蓟县系)硅质岩成因判别图件^[4]一起,综合多种标志系统探讨了岩石中硅质成因。

王全口组 2 件硅质岩样品 HT-03 和 QS-02, Fe/Ti 比值分别为 48 和 44, $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti}$ 比值分别为 49.72 和 44.80, $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 比值分别为 0.14 和 0.15,显示热水硅质岩特征,且投影点均落在 Adachi^[14]等的 Al-Fe-Mn 三角图中的热水沉积硅质岩区。然而,王全口组硅质岩和硅质白云岩 Fe_2O_3 和 MnO 含量分别为 0.33% 和 0.05%, 0.39% 和 0.02%,均低于热水或火山成因硅质岩 Fe_2O_3 (0.82%~2.67%,平均值为 1.74%) 和 MnO (0.78%~0.80%)

含量(表 1)^[10-11]。王全口组硅质岩和硅质白云岩 Sb, Bi 和 Ga 含量分别为 0.08×10^{-6} 和 0.14×10^{-6} , $< 0.1 \times 10^{-6}$, 0.23×10^{-6} 和 1.21×10^{-6} ,上述元素含量均小于黎彤等碳酸盐岩和热水沉积物中上述元素丰度或含量^[18,20],且其内 As 元素平均含量 (2.10×10^{-6} 和 4.75×10^{-6}) 也远低于热水沉积物含量的 As (200×10^{-6}) (表 2)^[18]。

王全口组硅质岩和硅质白云岩样品投影点均落入 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ 图解中的生物成因区(图 2a),与邓昆等镇探 1 井王全口组(原蓟县系)3 件硅质岩样品^[3]和郭超等陇县固关硅质白云岩样品投影结果一致^[3];在 $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 和 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 双变量硅质岩成因判别图解上^[11](图 2b, c),王全口组硅质岩和硅质白云岩与前苏联麦维姆河上游的生物化学沉积硅质岩投影区基本一致,均落入或邻近生物成因硅质岩区,而与苏联别洛耶湖凝灰质硅质岩分布位置相距较远。此外,王全口组白云岩样品 Mo 的平均含量 (0.34×10^{-6}) 与黎彤^[20]碳酸盐岩 Mo (0.4×10^{-6}) 元素丰度相同,而王全口组硅质岩和硅质白云岩样品 Mo 的平均含量分别为 1.75×10^{-6} , 1.33×10^{-6} (表 2),其平均丰度值分别是黎彤^[20]碳酸盐岩 Mo (0.4×10^{-6}) 元素丰度的 4.38 和 3.33 倍,均与生物成因硅质岩高 Mo 的特征一致,这显示王全口组碳酸盐岩系中 Mo 含量的背景值较低,硅质岩和硅质白云岩中高 Mo 的特征应该是生物成因的结果。

$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ (图 2a), $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 和 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图 2b, c)中,王全口组硅质岩和硅质白云岩样品均投影至生物成因区特征,以及其内生物活动元素 Mo 高度富集的特征和其内 Fe_2O_3 , MnO, As, Sb, Bi 和 Ga 等元素含量与热水成因硅质岩明显不同特征,均表明了硅质岩的形成与生物活动有关,应属于生物成因。至于硅质岩样品显示热水沉积特征,这可能是其沉积期区域古水温较高 (31.1°C , $n = 24$) 的缘故,而不是热液影响的结果。

4 古沉积环境

Al, Ti 和稀土元素的富集主要与陆源粘土矿物的输入有关^[15],其含量指示了陆源物质的影响程度。王全口组样品的 Al_2O_3 与 TiO_2 含量都非常低,其平均含量分别为 0.40% 和 0.03%,远低于中国东部上地壳碳酸盐岩 Al_2O_3 (13.65%) 和 TiO_2 (0.65%) 含量平均值^[21];王全口组白云岩稀土元素总量 ($\sum \text{REE}$) 为 $2.04 \times 10^{-6} \sim 23.80 \times 10^{-6}$,平均为 7.99×10^{-6} ,其值也远低于北美页岩组合样 (173.2×10^{-6})^[22] 和澳大利亚后太古界页岩组合样 (184.77×10^{-6})^[23] 的稀土

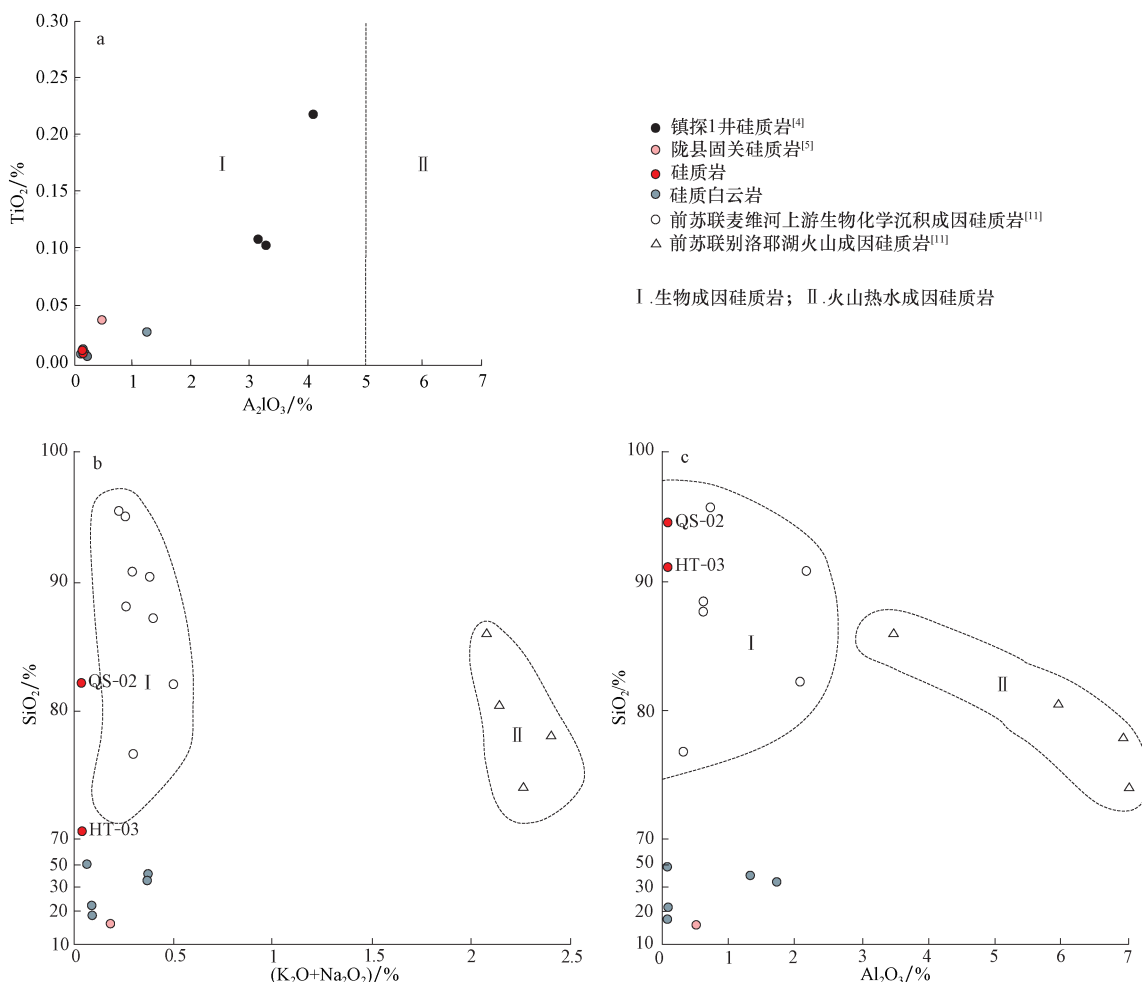


图2 鄂尔多斯盆地王全口组硅质白云岩和硅质岩样品 $TiO_2-Al_2O_3$ ^[4] (a), $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ ^[11] (b) 和 $SiO_2-Al_2O_3$ ^[11] (c) 硅质岩判别图

Fig. 2 Genetic diagram of $TiO_2-Al_2O_3$ ^[4] (a), $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ ^[11] (b) and $SiO_2-Al_2O_3$ ^[11] (c) of samples from the Wangquankou Formation, Ordos Basin

元素总量。海相碳酸盐岩的成岩蚀变过程是一个 Mn 的获取过程和 Sr 的丢失过程,碳酸盐岩的 Mn/Sr 值常被用来指示碳酸盐岩样品的成岩蚀变程度及其对海水信息的保存性^[24-26],并认为 Mn/Sr 比值小于 3 的碳酸盐岩没有或受到弱成岩作用的影响^[24-25,27]。

王全口组样品较低的 Al_2O_3 , TiO_2 含量和极低的稀土元素总量均表明其沉积时受陆源物质的影响比较微弱,均为纯生物或化学成因的岩石,选择其内 Mn/Sr 值小于或接近于 3 的白云岩样品和硅质岩以及砂岩样品共同来重建当时的古环境和古气候,其结果应是合理和可信的。

4.1 氧化还原环境判别

已有研究表明,沉积岩的 V/Cr , Ni/Co , $V/(V+Ni)$, Ce/La 和 U/Th 分别大于 4.25, 7, 0.84, 2.0 和 1.25 对应的是缺氧还原环境,小于 2, 5, 0.6, 1.5 和 0.75 对应富氧化环境,介于二者之间者,为过渡环境或贫氧环境^[28-31]。然而由于受 Th 元素放射性衰

变减少或 U 元素热液活动增加的影响, U/Th 比值会变大,以致失去对沉积环境的指示作用,尤其会对古老沉积层沉积环境的判别受限^[32]。对于元古界沉积而言, V/Cr , Ni/Co 对缺氧或还原环境判别相对准确^[29], Ce/La 和 $V/(V+Ni)$ 次之, U/Th 判别结果不太理想。

V/Cr 和 Ni/Co 氧化还原环境判别图(图 3a, b)显示王全口组所有样品均形成于富氧化环境或贫氧过渡环境。 $V/(V+Ni)$ 氧化还原环境判别图(图 3c)显示,除岐山 QS-03 白云岩样品位于贫氧过渡环境和缺氧还原环境交界附近外,其他王全口组样品均形成于富氧化环境或贫氧过渡环境中。 Ce/La 氧化还原环境判别图(图 3d)显示,仅陇县 JX1 和 JX3 等少量样品略微显示缺氧还原环境特征,其它王全口组样品均形成于富氧化环境或贫氧过渡环境中。总之,氧化还原环境判别图整体表明王全口组整体形成于富氧或贫氧过渡状态下的浅水沉积环境,这与白云岩形成于浅水碳酸盐岩潮坪相的认识是一致的。

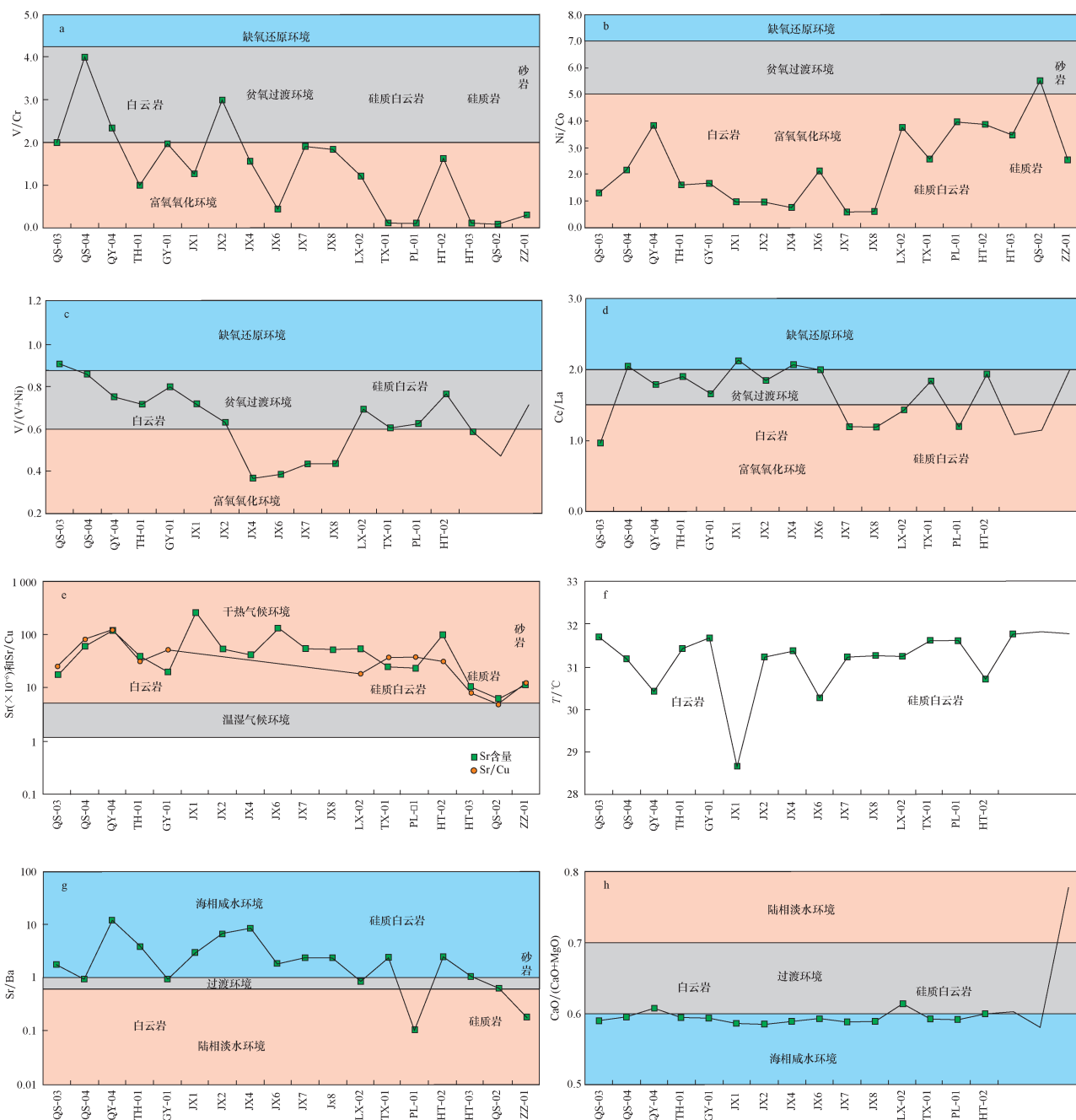


图3 鄂尔多斯盆地王全口组样品 V/Cr , Ni/Co , $V/(V+Ni)$, Ce/La , Sr/Cu , T , Sr/Ba 和 $CaO/(CaO+MgO)$ 沉积环境判别图

Fig. 3 Sedimentary environment identified according to V/Cr , Ni/Co , $V/(V+Ni)$, Ce/La , Sr/Cu , T , Sr/Ba and $CaO/(CaO+MgO)$ for the Wangquankou Formation, Ordos Basin

4.2 气候(干旱)环境判别

在干燥气候条件下,由于水分的蒸发, Sr 大量析出形成各种盐类沉积在水底,以致岩石中 Sr 含量相对增高。因而, Sr 含量和 Sr/Cu 比值是判别气候干湿环境的常用指标。通常, Sr/Cu 比介于 $1.3 \sim 5.0$ 指示温湿气候,而大于 5.0 则指示干热气候^[33],但也有人认为 Sr/Cu 比值介于 $1 \sim 10$ 指示温湿气候,大于 10 指示干热气候^[34]。此外,前人还通过实践,总结出了利用微量元素 Sr 含量($y, 10^{-6}$)和古水温度($T, ^\circ C$)之间关系的经验公式(即 $y = 2\,578 - 80.8T$)^[35-36]。

Sr/Cu 比值图解显示(图3e),王全口组白云岩、硅质白云岩、硅质岩和砂岩样品 Sr/Cu 比值均大于 5 ,显示全部样品均形成于干热气候。 Sr 含量与 Sr/Cu 比值之间呈线性关系($Sr = 0.40Sr/Cu + 2.64$, 相关系数为 0.71),表现出明显的线性正相关,表明 Sr/Cu 比值对古气候的判别结果非常理想。研究区王全口组样品古水温在 $29 \sim 32\,^\circ C$, 平均为 $31\,^\circ C$ (图3f),水温总体偏高,仅陇县 Jx1 样品形成古水温较低($28.7\,^\circ C$)。古水温数据与 Sr/Cu 比值反映的结果一致,即王全口组沉积期区域古水温相对最高,应为干燥炎热的气候背景。

4.3 海陆环境判别

古盐度是指示地质历史时期海陆环境变化的一个重要标志。介质中所有可溶盐的质量分数称为盐度,它是区别海相沉积和陆相沉积的重要指标。

Sr 和 Ba 的沉积主要与蒸发作用有关,因 Sr 迁移能力比 Ba 强,随着水体盐度增加, Ba 常以 BaSO_4 的形式首先沉淀,造成 Sr 在干旱条件下的海水中相对 Ba 趋于富集,以致 Sr/Ba 比值与古盐度呈明显正相关性^[37]。此外, $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO})$ 比值也可以有效地判别沉积岩的介质环境^[38]。

一般, $\text{Sr}/\text{Ba} > 1$ 时为海相咸水环境沉积, $\text{Sr}/\text{Ba} < 0.6$ 为陆相淡水环境沉积,其间为过渡环境沉积^[39-40]。 $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO}) > 0.70$ 是为陆相淡水环境沉积, $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO}) < 0.60$ 为海相咸水环境沉积^[38]。

Sr/Ba 比值海陆环境判别图解显示(图 3g),除桌子山(ZZ-01)砂岩样品和平凉麻川(PL-01)硅质白云岩样品显示淡水特征($\text{Sr}/\text{Ba} < 0.6$)外,其他王全口组样品均显示海相咸水环境或过渡环境沉积特征。 $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO})$ 海陆环境判别图解则显示桌子山(ZZ-01)砂岩样品外(图 3h),其他王全口组样品均显示海相咸水环境或过渡环境沉积特征。此外,王全口组白云岩 Y 异常(Y 异常用 $Y/Y^* = 2Y_{\text{paas}}/(\text{Dy}_{\text{paas}} + \text{Ho}_{\text{paas}})$) 在 0.96 ~ 1.78 (平均值 1.32),具有典型海相碳酸盐岩具有的 Y 正异常特征^[41],王全口组白云岩样品 $(\text{La}/\text{Nd})_{\text{pass}}$ 值在 0.63 ~ 1.65,也处于正常海水的 $(\text{La}/\text{Nd})_{\text{pass}}$ 值(0.8 ~ 2)范围之内^[41]。

海陆环境判别图、Y 异常和 $(\text{La}/\text{Nd})_{\text{pass}}$ 值均表明王全口组白云岩、硅质白云岩和硅质岩整体形成于海相咸水环境或次咸水过渡沉积环境,而砂岩样品则形成于陆缘淡水沉积环境。这也与王全口组碳酸盐层系形成于海相浅水碳酸盐岩潮坪相的认识是一致的。

5 古构造沉积背景

构造背景通过对古地理环境的控制,而控制着物源区的岩石和化学组成。在正常的海相环境中,海相碳酸盐岩沉积物 Ce 异常特征,主要继承上覆水体 Ce 异常,且常具有 Ce 的负异常^[42],且从大陆架至开阔海盆地逐渐由弱 Ce 负异常变为强 Ce 负异常,但在一些相对封闭的海水环境下 Ce 可能保存正常^[43]。一般,大陆边缘硅质岩弱 Ce 负异常,有时为 Ce 正异常, δCe 约为 1.09 ± 0.25 , $\text{La}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}$ 为 0.5 ~ 1.5, ΣREE 为 6.7 ~ 14.9,洋中脊硅质岩,强 Ce 负异常, $\delta\text{Ce} = 0.30 \pm 0.13$, $\text{La}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}$ 约为 3.50, $\Sigma\text{REE} \approx 11.77$,远洋盆地,

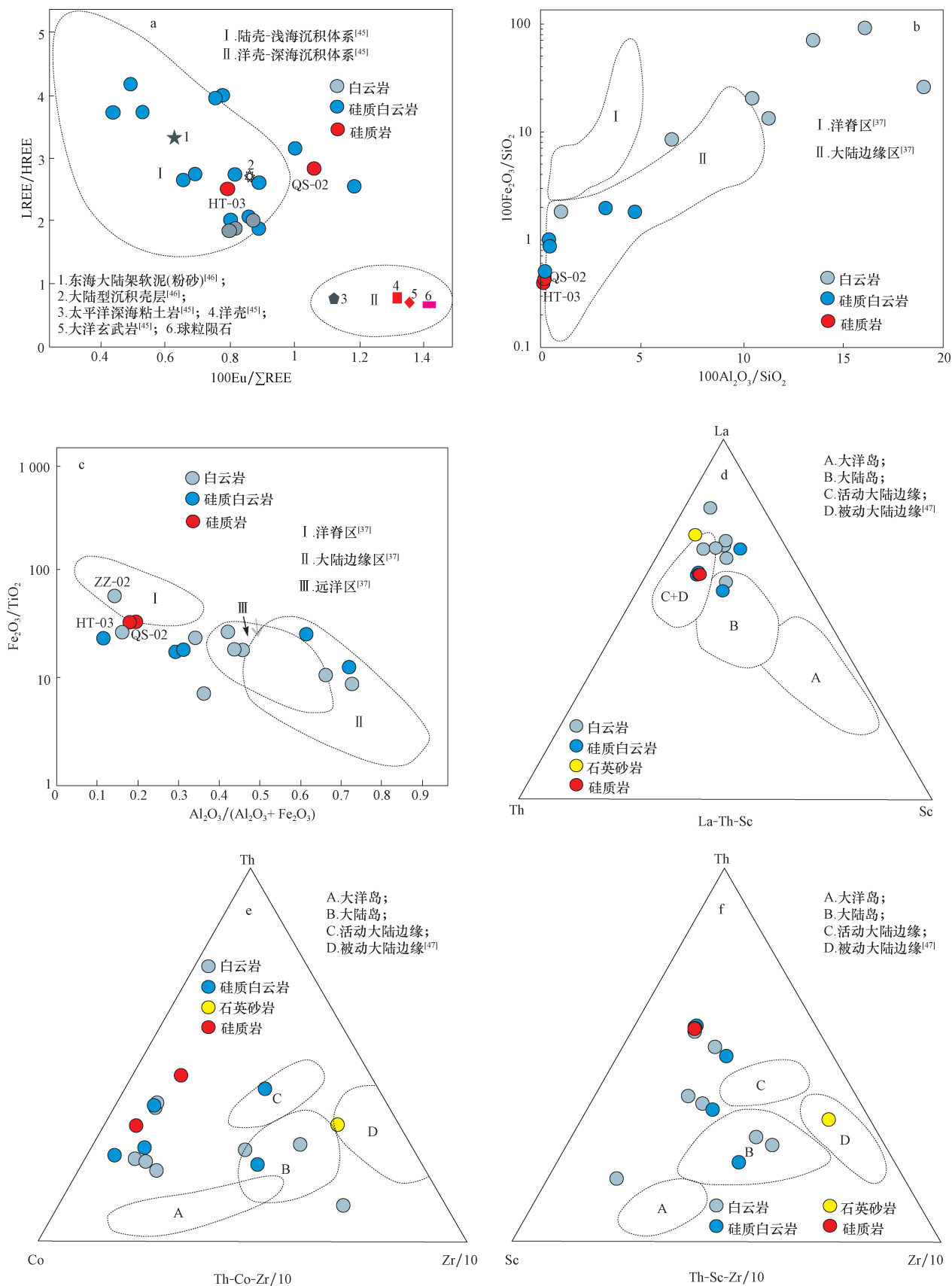
Ce 负异常明显, δCe 约为 0.60 ± 0.13 , $\text{La}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}$ 为 1.0 ~ 2.5^[44-45]。Murray 研究揭示,用 $100\text{Eu}/\Sigma\text{REE}$ (含 Y) - LREE/HREE (含 Y) 图解可以区分陆壳 - 浅海沉积体系与洋壳 - 深海沉积体系沉积^[45-46],用 $100(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2) - 100(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 关系图能判别硅质岩的构造沉积背景^[45]。此外, Bhatia 研究表明从大洋岛弧到大陆岛弧、活动大陆边缘、被动大陆边缘, La 和 Th 含量逐渐增高,而过渡性元素 Sc, Co, Zr 系统地减少,利用 La - Th - Sc, Th - Co - Zr/10, Th - Sc - Zr/10 等判别图也可以判别源区的构造沉积环境^[47]。

王全口组样品 Ce 异常值介于 0.14 ~ 2.91,平均为 0.87, $\text{La}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}$ 位于 5.3 ~ 21.91,平均值为 10.58, ΣREE 含量处于 2.30 ~ 38.57,平均值为 12.48 (表 3)。上述王全口组样品 δCe , ΣREE 含量与大陆边缘沉积接近,与洋中脊、远洋盆地差距极大,但其 Ce^* 和 $\text{La}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}$ 值则与大陆边缘沉积有明显差距, Ce 正异常特征应与陆缘较封闭环境有关。在 $100\text{Eu}/\Sigma\text{REE} - \text{LREE}/\text{HREE}$ 图解(图 4a)中,王全口组白云岩样品多数落入的陆壳 - 浅海沉积体系区。在 $100(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2) - 100(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)$ 图(图 4b), La - Th - Sc (图 4d), Th - Co - Zr/10 (图 4e), Th - Sc - Zr/10 (图 4f) 构造环境判别图中,王全口组样品投影点尽管较分散,除桌子山(ZZ-02)白云岩样品落入被动陆缘区,其它均落入非大洋岛弧区。在 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 图(图 4c)中,仅桌子山样品(ZZ-02)落入洋脊区。

上述图解显示王全口组样品的地化特征与经典洋脊区(热水)和被动陆缘区沉积岩石均较大差别,而多数样品与活动陆缘和大陆岛弧构造沉积岩石相似。经澳大利亚后太古宙页岩标准化的王全口组稀土配分曲线特征也与大陆岛弧的稀土配分曲线特征相似(图 5),而与被动陆缘和洋岛等构造环境的稀土元素配分曲线特征差别较大。

由王全口组白云岩样品的大陆岛弧稀土元素配分曲线特征(图 5)、陆壳 - 浅海沉积体系沉积特征(图 4a)和陆缘硅质岩 δCe , $\text{La}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}$ 特征,以及大陆边缘、活动陆缘和大陆岛弧的地化特征(图 4b—d),结合王全口组受物源影响较小特征及其整体形成于气候干热的海相或过渡相富氧咸水沉积背景的认识,表明王全口组沉积期研究区应处于大陆岛弧后侧的较稳定的弧后拗陷构造背景下。

白云岩中稀土元素含量高低与陆缘粘土矿物输入的多少有关,陆源粘土矿物输入多,则其内稀土元素含量高。陇县固关、炭山地区白云岩样品和位于盆地内侧边缘桌子山地区的白云岩样品同样具有高稀土元素

图 4 鄂尔多斯盆地王全口组构造沉积背景判别图解^[37,45-47]Fig. 4 Diagram indicating structural-sedimentary backgrounds for the Wangquankou Formation^[37,45-47], Ordos Basin

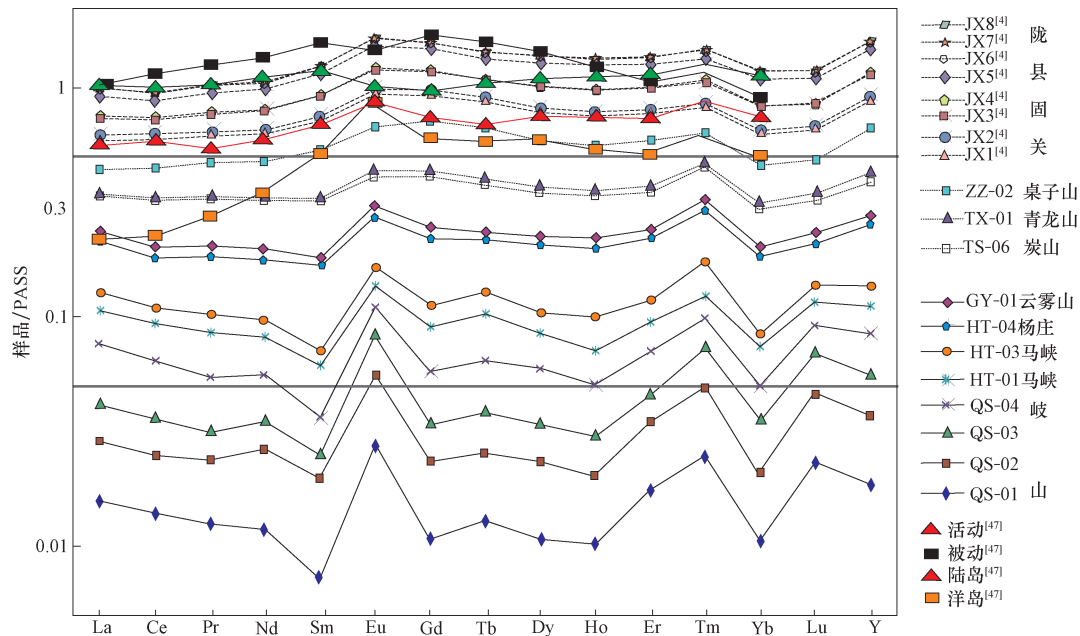


图5 鄂尔多斯盆地王全口组白云岩 PAAS - 标准化稀土元素配分曲线

Fig. 5 PASS-normalized REEs patterns in dolomites from the Wangquankouzu Formation, Ordos Basin

含量的特征,表明上述地区白云岩内粘土矿物含量较高,进而说明隄县固关、炭山地区离物源区也较近,也显示当时鄂尔多斯盆地西南缘可能存在古大陆岛弧。这与王全口组白云岩样品大陆岛弧稀土元素配分曲线特征一致,均表明王全口组沉积时研究区位于大陆岛弧后侧的弧后拗陷构造背景下的认识应该是合理的。

和大陆边缘硅质岩 δCe 和 La_N/Ce_N 特征,均表明王全口期鄂尔多斯西南部可能处于陆缘岛弧后侧的稳定弧后拗陷构造背景下。

4) 在弧后构造拗陷构造环境下,在干热气候、浅水的海陆过渡环境中,区域发育了一套生物化学成因的王全口组碳酸盐岩沉积。

6 结论

1) 鄂尔多斯盆地西南部王全口组碳酸盐岩以白云岩、硅质白云岩为主,并含有少量硅质岩和石英砂岩;硅质岩多呈透镜状或夹层状赋存于白云岩中,少量与白云岩呈互层状产出,硅质岩为生物化学成因,王全口组碳酸盐岩几乎均未遭受陆源碎屑物质的影响。

2) V/Cr , Ni/Co , $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 和 Ce/La 氧化还原环境判别图件显示,王全口组整体形成于富氧或贫氧过渡状态下的浅水沉积环境; Sr/Ba 和 $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO})$ 海陆环境判别图、Y 异常和 $(\text{La}/\text{Nd})_{\text{pass}}$ 值均表明王全口组白云岩、硅质白云岩和硅质岩整体形成于海相咸水环境或次咸水过渡沉积环境,而砂岩样品则形成于陆缘淡水沉积环境;古水温数据与 Sr/Cu 比值表明王全口组沉积期区域古水温较高(31°C),反映干燥炎热的气候背景。

3) 王全口组白云岩样品大陆岛弧稀土元素配分曲线特征,在 $100\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - 100\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, $\text{La} - \text{Th} - \text{Sc}$, $\text{Th} - \text{Co} - \text{Zr}/10$, $\text{Th} - \text{Sc} - \text{Zr}/10$ 图中落入活动陆缘和大陆岛弧区,及其在 $100\text{Eu}/\sum \text{REE} - \text{LREE}/\text{HREE}$ (含 Y) 图解中落入陆壳 - 浅海沉积体系区特征

参 考 文 献

- [1] 李荣西,梁积伟,翁凯. 鄂尔多斯盆地西南部蓟县系古油藏沥青[J]. 石油勘探与开发,2011,38(2):168-173.
Li Rongxi, Liang Jiwei, Weng Kai. Paleo-reservoir bitumen of Middle Protozoic Jixian System in the southwest margin of the Ordos Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 168-173.
- [2] 付金华,魏新善,任军峰,等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探形势与发展前景[J]. 石油学报,2006,27(6):1-13.
Fu Jinhua, Wei Xinshan, Ren Junfeng, et al. Gas exploration and developing prospect in Ordos Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2006, 27(6): 1-13.
- [3] 王同和. 晋陕地区地质构造演化与油气聚集[J]. 华北地质矿产杂志,1995,10(3):283-398.
Wang Tonghe. Evolutionary characteristics of geological structure and oil-gas accumulation in Shanxi-Shaanxi area [J]. Jour Geol & Min Res North China, 1995, 10(3): 283-398.
- [4] 邓昆,张哨楠,周立发,等. 鄂尔多斯盆地西南缘蓟县系沉积环境与生烃潜力[J]. 天然气工业,2009,29(3):21-24.
Deng Kun, Zhang Shaonan, Zhou Lifa, et al. Sedimentary environment and hydrocarbon generation potential for Jixian system in the southwest margin of Ordos basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(3): 21-24.
- [5] 郭超,张忠良,陈宝赞,等. 隄县固关地区蓟县系白云岩地球化学特征及沉积环境[J]. 西北大学学报:自然科学网络版,2014,12

- (3):1-8.
- Guo Chao, Zhang Zhongliang, Chen Baoyun, et al. A study of the geochemical characteristics of dolomite of the Middle Proterozoic Jixian system and its sedimentary environment [J]. Science Journal of Northwest University (Online), 2014, 12(3):1-8.
- [6] 苗建宇, 赵建设, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地南部烃源岩沉积环境研究[J]. 西北大学学报, 2005, 35(6):771-776.
- Miao Jianyu, Zhao Jianshe, Li Wenhui, et al. Research on the deposited environments about source rocks in south Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(6):771-776.
- [7] 邸领军. 鄂尔多斯盆地基底演化及沉积盖层相关问题的探究 [D]. 陕西 西安: 西北大学, 2003.
- Di Lingjun. Research on Related Problems of Basement Evolution and Sedimentary Cover in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwestern University, 2003.
- [8] 张福礼. 鄂尔多斯盆地天然气地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- Zhang Fuli. Natural gas geology in Ordos basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [9] 韩银学, 李忠, 韩登林, 等. 塔里木盆地北东部下奥陶统基质白云岩的稀土元素及其成因 [J]. 岩石学报, 2009, 29(25):2405-2416.
- Han Yinxue, Li Zhong, Han Denglin, et al. REE characteristics of matrix dolomites and its origin of Lower Ordovician in eastern Tabei area, Tarim basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10):2405-2416.
- [10] Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto terranes [J]. Sedimentary Geology, 1987, 52:65-108.
- [11] 王东安. 雅鲁藏布江深断裂带所产硅质岩的特征及其成因 [C]//中国科学院青藏高原综合科学考察队, 西藏南部的沉积岩, 北京, 1981:52-72.
- Wang Dongan. The characteristics and genesis of the silicalite coming from Brahmaputra deep fault [C]//Qinghai-Tibet plateau synthesis Science review team of CAS, The sedimentary rocks of southern Tibet, Beijing, 1981:52-72.
- [12] Hein J R, Vallier T L, Allan M A. Chert petrology and geochemistry, Mid pacif mountains and Hess Rise, deep sea drilling project Log62 [J]. Initial reports of the deep sea drilling project, 1981, 62:711-748.
- [13] 韩发, Hutchinson R W. 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积的证据—含矿建造及热液沉积岩 [J]. 矿床地质, 1989, 8(2):25-40.
- Han Fa, Hutchinson R W. The evidence of hydrothermal jet sedimentary tin polymetallic deposits of Dachang-Geology of deposit, Geochemistry. Deposit Geology [J]. Deposit Geology, 1989, 8(2):25-40.
- [14] Adachi M, Yamamoto K, Suigiski R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the Northern Pacific; their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. Sedimentary Geology, 1986, 47:125-148.
- [15] 黄虎, 杜远生, 等. 桂西晚古生代硅质岩地球化学特征及其对右江盆地构造演化的启示 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(2):304-316.
- Huang Hu, Du Yuansheng, Huang Zhiqiang, et al. Depositional chemistry of chert during late Paleozoic from western Guangxi and its implication for the tectonic evolution of the Youjiang Basin [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 56:479-493, doi:10.1007/s11430-012-4496-y.
- [16] Bostrom K. Genesis of ferromanganese deposits—diagnostic criteria for recent and old deposits [C]//Rona P A et al. ed. Hydrothermal processes at seafloor spreading center. New York, 1983:473-483.
- [17] Boström K, Kraemer T, Gartner S. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments [J]. Chemical Geology, 1973, 11:123-148.
- [18] Marchig V H, Gundlach P, Moller F. Schley. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metaliferous sediments [J]. Marine Geology, 1982, 50:241-256.
- [19] Rona P A. Criteria for recognition of hydrothermal mineral deposits in ocean crust [J]. Economic Geology, 1978, 73:135-160.
- [20] 黎彤, 郭范. 元素丰度表 [J]. 地质与勘探, 1982, 11:1-2.
- Li Tong, Guo Fan. Element abundance table [J]. Geology and Exploration, 1982, 11:1-2.
- [21] 高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 中国东部地壳的结构和组成 [J]. 中国科学 (D 辑), 1999, 29(3):204-213.
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, et al. Structure and composition of the earth's crust in Eastern China [J]. Science in China (Series D), 1999, 29(3):204-213.
- [22] Gromet L P, Dymek R F, Haskin L A, et al. The "North American shale composite": Its complication, major and trace element characteristics [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48:2469-2482.
- [23] Rollison H R, 杨学明, 杨晓勇, 等. 岩石地球化学 [M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2000.
- Rollison H R, Yang Xueming, Yang Xiaoyong, et al. Lithogeochemistry [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2000.
- [24] Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 120:409-430.
- [25] Derry L A, Kaufman A J, Jacobsen S B. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: Evidence from stable and radiogenic isotopes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56:1317-1329.
- [26] Derry L A. A burial diagenesis origin for the Ediacaran Shuram-Wonoka carbon isotope anomaly [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 294:152-162.
- [27] 侯恩刚, 高金汉, 王训练, 等. 西藏改则上三叠统日干配组碳酸盐岩地球化学特征及沉积环境意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(3):556-563.
- Hou Engang, Cao Jinhan, Wang Xunlian, et al. Geochemical characteristics and environmental significance of the Upper Triassic Rigangpeicuo Formation in Gaize, Tibet [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(3):556-563.
- [28] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1-3):65-82.

- [29] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111 (1-4): 111-129.
- [30] Bai S L, Bai Z O, Ma X P. Devonian events and biostratigraphy of South China [M]. Beijing: Peking University Press, 1994, 21-24.
- [31] Rimmer S M, Thompson J A, Goodnight S A, et al. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippi an marine black shales: geochemical and petrographical evidence [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 215 (1-2): 125-154.
- [32] 杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙, 等. 黔东南寒武纪-寒武纪转换时期微量元素地球化学特征研究 [J]. *地质学报*, 2007, 81 (10): 1391-1397.
- Yang Xinglian, Zhu Maoyan, Zhao Yuanlong, et al. Trace element geochemical characteristics from the Ediacaran Cambrian Transition interval in eastern Guizhou South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81 (10): 1391-1397.
- [33] Lerman. Chemistry, Geology and Physics of Lake [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.
- [34] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例 [J]. *石油实验地质*, 2007, 29 (3): 307-314.
- Liu Gang, Zhou Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment-taking Qianjiang Formation in the Jiang Han Basin as an exam [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29 (3): 307-311.
- [35] 袁海军, 赵兵. 川西雅安-名山地区白垩系泥岩的地球化学特征及古气候探讨 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32 (1): 78-83.
- Yuan Haijun, Zhao Bing. Geochemical and palaeoclimatic approaches to the Cretaceous mudstones in the Ya'an-Mingshan zone, Western Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32 (1): 78-83.
- [37] 罗顺社, 汪凯明. 元素地球化学特征在识别碳酸盐岩层序界面中的应用—以冀北拗陷中元古界高于庄组为例 [J]. *中国地质*, 2010, 37 (2): 430-437.
- Luo Shunshe, Wang Kaiming. The application of element geochemical characteristics to recognition of carbonate sedimentary sequence boundary: A case study of the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in northern Hebei Depression [J]. *Geology in China*, 2010, 37 (2): 430-437.
- [38] Dasgupta H C, Rao V V S, Krishna C. Chemical environments of deposition of ancient iron-and manganese-rich sediments and cherts [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 125: 83-98.
- [39] 王益友, 郭文莹, 张国栋, 等. 几种地化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 (自然科学版)*, 1979, 7 (2): 51-60.
- Wang Yiyu, Guo Wenying, Zhang Guodong, et al. Application of some geochemical indicators in determining of Sedimentary environment of the funing group (Paleogene), Jin-Hu depression, Kiangsu province [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 1979, 7 (2): 51-60.
- [40] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究 [J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20 (1): 20-25.
- Zheng Rongcai, Liu Haiqing. Study on Palaeosalinity of Chang6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20 (1): 20-25.
- [41] Ramasamy N, Jayagopal M, John S A, et al. Geochemistry of Neoproterozoic limestones of the Shahabad Formation, Bhima Basin, Karnataka, southern India [J]. *Geosciences Journal*, 2011, 15 (1): 9-25.
- [42] Wright J, Seymour R S, Shaw H. REE and Nd isotopes in conodont apatite: Variations with geological age and depositional environments [J]. *Geological Society of America*, 1984, 196: 325-340.
- [43] 黄喜峰, 钱壮志, 谔东霞, 等. 贺兰山中南段奥陶系米钵山组的沉积环境与构造背景分析 [J]. *地球学报*, 2009, 30 (1): 65-71.
- Huang Xifeng, Qian Zhuangzhi, Lu Dong-xia, et al. Element geochemistry and depositional setting of Ordovician Miboshan Formation in central-southern Helan Mountain [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30 (1): 65-71.
- [44] Murry R W. Rare earth element as indication of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18: 268-271.
- [45] Murry R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90: 213-232.
- [46] 田洋, 赵小明, 牛志军, 等. 鄂西南利川二叠纪吴家坪组硅质岩成因及沉积环境 [J]. *沉积学报*, 2013, 31 (4): 590-599.
- Tian Yang, Zhao Xiaoming, Niu Zhijun, et al. Petrogenesis and sedimentary environment of Permian Wujiaping Formation siliceous rocks in Lichuan, Southwestern Hubei [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31 (4): 590-599.
- [47] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986 92: 181-193.

(编辑 董立)