http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx

海底热水活动与海相富有机质层形成的关系
——以华北新元古界青白口系下马岭组为例

孙省利[1)] 陈践发[1,2)] 刘文汇[1)] 张水昌[3)] 王大锐[3)]

1) 中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室,730000

2) 石油大学,北京,102200; 3) 中国石油勘探开发研究院,北京,100083

内容提要 对华北新元古界青白口系下马岭组富有机质层段的常量元素、微量元素和有机质含量进行了系统分析,其基本特征是富有机质沉积层段的 SiO_2含量明显高于泥质岩中的含量,SiO_2含量与TOC成正相关系,与 TiO_2含量成反比,Si/(Si+Al+Fe)比值与TOC成正相关关系;与海底热水流体活动有关的P、Cu、Zn、Co、Ni、V等元素含量明显富集,Ba/Sr比值远远大于1,且与TOC之间成正相关关系。在下马岭组剖面上,从 Qb_1x^3向上纹层—薄层状硅质岩夹层增多,有机质含量也开始急剧增高。地质地球化学特征表明,在下马岭组富有机质沉积层段形成时,盆地拉张沉降作用强烈,海底热水活动与之紧密相伴,而且海底热水流体活动是导致该富有机质沉积层段形成的主要原因。

关键词 下马岭组 海相沉积 有机质 海底热水活动

海底热水流体活动的发现和研究,被认为是继板块运动发现以来地质学界的又一次重大突破(陈先沛等,1992)。自20世纪60年代在基伍湖和红海海底发现热水流体活动以来,在海底热水活动区不但发现了海底热水沉积成矿现象,而且更有趣的发现是繁盛的嗜热生物群落(Rona,1984;Haymon et al.,1993;Pichler et al.,1996,1999;Heikoop et al.,1996;Sedwick et al.,1996;Marani et al.,1997)。对红海海底28000年来热水沉积物中的微量元素和有机质分析表明,除了Cu、Pb、Zn等成矿元素富集外,有机碳含量普遍较高,分布范围为0.85%~7.76%,且绝大多数样品的TOC分布在1%~2%之间(Shanks et al.,1980)。地质历史中海底热水沉积矿床研究证明,这类矿床均赋存在有机质含量高的地层单元中(涂光炽等,1988;孙海田等,1990;解启来等,1999;孙省利,1999;林丽,2001),而且富有机质地层单元呈凸镜状分布,分布范围较矿床分布范围大。从太古宙至中生代的热水沉积矿床中,都发现有嗜热生物群落出现(Haymon et al.,1984;Walsh et al.,1985;Duhig et al.,1992;Walter et al.,1996;Trewin et al.,1999),研究者认为生物发祥于海洋热水环境之中(Corliss et al.,1981;Jannasch et al.,1985)。这些现象基本表明海底热水流体活动,会导致海底嗜热生物群落繁盛,从而使沉积单元中有机质含量增高。但在研究海相优质烃源岩形成特征及分布方面,还很少见有此方面的报道。

1 地层特征

华北地台新元古界青白口系下马岭组主要分布在燕辽沉降带内。本研究采样地层剖面位于北京门头沟区下马岭和河北张家口下花园下家河剖面,两地地层比较简单,界线明显。下马岭组底界为蓟县系铁岭组,二者呈平行不整合接触,顶部与青白口系龙山组整合接触,在下花园剖面顶部与下侏罗统下花园组呈角度不整合接触。

下马岭组自下而上可分为5个岩性段(图1),分别为 Qb_1x^1黑色页岩、粉砂岩少量白云岩,厚约40余米;Qb_1x^2下部10m黄绿色页岩、粉砂质泥岩(单层厚0.5~2cm)与泥质粉砂岩薄层互层,上部为质纯的黄绿色泥岩,厚约100m左右;Qb_1x^3黑灰色薄板状硅质岩、硅质页岩、棕色页岩互层,厚约17m;Qb_1x^4主要为黑色碳质泥岩夹硅质岩薄层,硅质岩薄层一般厚约2~5cm,向上硅质岩厚度变薄,层数逐渐变少,硅质岩常呈灰—灰黑色纹层状,本岩性段厚约90m;

注:本文为国家重点基础研究"973"项目(编号G1999043306)及气体地球化学国家重点实验室主任基金项目的成果。

收稿日期:2002-10-22;改回日期:2003-04-03;责任编辑:王思恩。

作者简介:孙省利,男,1963年生。2001年于成都理工大学获博士学位。现为中国科学院兰州地质研究所国家气体地球化学重点实验室博士后研究人员,副研究员。主要从事沉积地球化学方面的研究。通讯地址:730000,兰州市东岗西路324号,中国科学院兰州地质研究所;电话:0931—4960855;Email:xlsun218@hotmail.com。

Qb_1x^5下部为浅灰色页岩，约8m，中、上部为黑色页岩，厚约10m。

河北张家口下花园下家河剖面所采集的样品主要相当于下马岭组的Qb_1x^3和Qb_1x^4。

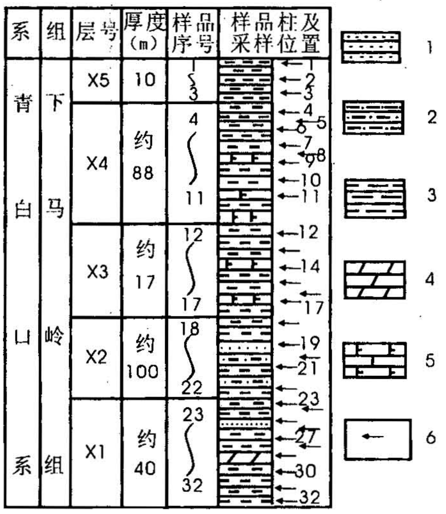

图1　北京门头沟下马岭剖面地层柱示意图及采样位置

Fig. 1　Sketch map of profile and sampling location of Xiamaling Formation in Mentougou, Beijing

1—粉砂岩；2—粉砂质泥岩；3—泥质岩；4—白云岩；5—硅质岩；6—采样位置

1—Siltstone；2—silt-mudstone；3—mudstone；4—dolomite；5—siliceous rocks；6—sampling location

2　富有机质层段的地球化学

海相富有机质沉积层段是指形成于海相沉积环境，在成岩及其后成作用过程中，能生成和排出烃类流体的岩石组合，其与海相烃源岩的意义相当。通过对国内外海相烃源岩有机质丰度统计对比，认为海相富有机质沉积层的划分以 TOC ≥ 0.5%（泥质岩类）为宜（Tissot et al., 1984）。

2.1　常量元素

从本研究分析的常量元素结果可看出（表1），在下马岭组富有机质沉积层的黑色页岩中 SiO_2含量明显高于页岩的平均成分（61.39%）（曾允孚等，1986），而 Al_2O_3、Na_2O 和 TiO_2则较低。SiO_2/Al_2O_3比值变化于3.4～15.2间，平均值为9.7。分析结果与野外

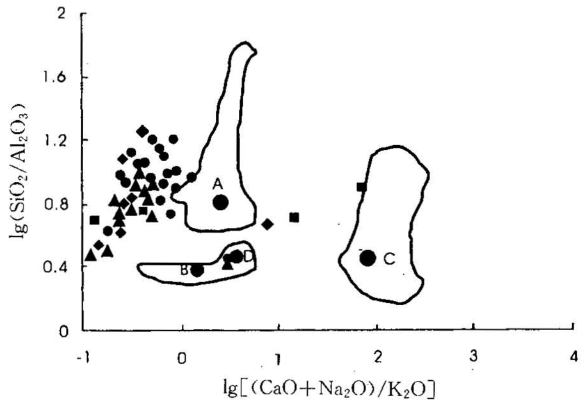

图2　沉积岩的(SiO_2/Al_2O_3)—[($CaO+Na_2O$)/K_2O]图解（原图据 Brownlw，1979）

Fig. 2　(SiO_2/Al_2O_3) vs. [($CaO+Na_2O$)/K_2O] diagram of sedimentary rocks (from Brownlw, 1979)

▲—下马岭，TOC>0.5%；◆—下马岭，TOC<0.5%；●—下花园，TOC>0.5%；■—下花园，TOC<0.5%；●A—砂岩平均值；●B—页岩平均值；●C—碳酸盐平均值；●D—火成岩平均值

▲—Xiamaling，TOC>0.5%；◆—Xiamaling，TOC<0.5%；●—Xiahuayuan，TOC>0.5%；■—Xiahuayuan，TOC<0.5%；●A—average composition of sandstone；●B—average composition of shale；●C—average composition of carbonate；●D—average composition of igneous rock

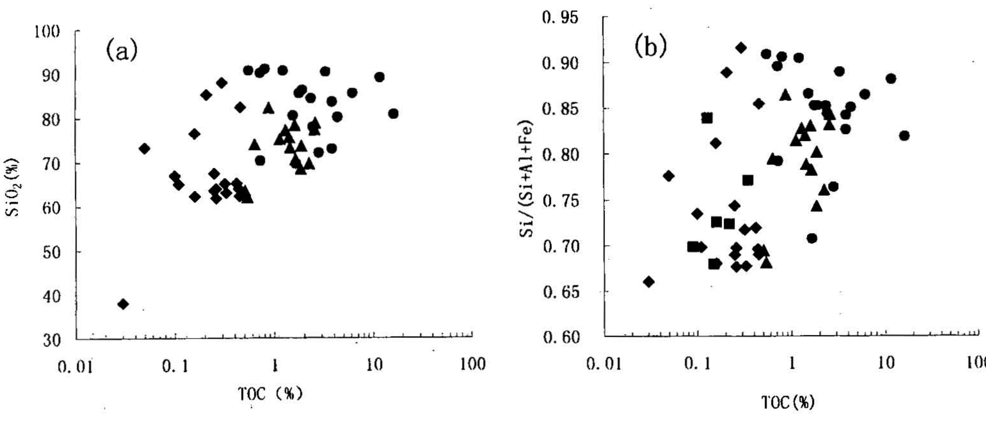

图3　富有机质沉积岩的 SiO_2—TOC(a)和 Si/(Si+Fe+Al)—TOC(b)关系图

Fig. 3　The diagram of SiO_2—TOC(a) and Si/(Si+Fe+Al)—TOC(b) in organic-rich sedimentary rocks

▲—下马岭，TOC>0.5%；◆—下马岭，TOC<0.5%；●—下花园，TOC>0.5%；■—下花园，TOC<0.5%

▲—Xiamaling，TOC>0.5%；◆—Xiamaling，TOC<0.5%；●—Xiahuayuan，TOC>0.5%；■—Xiahuayuan，TOC<0.5%

表 1 北京门头沟下马岭和河北张家口下花园两地新元古界下马岭组富有机质沉积岩的常量和微量元素组成

Table 1 The composition of major and minor elements for organic-rich sedimentary rocks of the Neoproterozoic Xiamaling Fm. in Xiamaling, Mentougou, Beijing, and in Xiahuayuan, Zhangjiakou, Hebei

序号	层位	剖面位置	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TFe	TiO_2	TOC	Mn	Ba	Sr	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	V	P	Zr	Ga	Cr	Y
			(%)									($\times10^{-6}$)													
1	Qb_1x^5	下马岭	69.52	12.84	0.59	1.71	0.47	4.51	4.91	0.34	2.25	109.9	530.1	66.9	76.2	23.9	119.5	14.0	82.4	157.2	516.4	187.7	17.5	83.5	32.6
2	Qb_1x^5	下马岭	68.39	14.02	0.59	1.65	0.43	4.40	5.21	0.35	1.86	139.1	509.4	73.1	104.2	45.1	108.5	15.7	71.6	167.2	572.6	206.5	16.9	98.3	31.5
3	Qb_1x^5	下马岭	66.91	16.97	0.30	1.20	0.20	5.67	3.33	0.44	0.10	105.5	472.8	46.5	13.7	49.1	19.3	9.6	10.7	96.2	133.3	204.9	21.2	62.2	26.9
4	Qb_1x^4	下马岭	77.08	11.65	0.48	1.14	0.25	3.42	1.92	0.26	1.31	103.1	663.0	74.7	63.6	56.9	28.0	5.8	32.5	97.1	1791.4	220.2	13.5	34.6	30.5
5	Qb_1x^4	下马岭	78.66	10.15	0.61	1.07	0.61	2.81	2.11	0.29	2.62	98.1	567.3	65.2	55.4	45.5	109.5	6.5	73.5	143.7	2387.4	171.6	11.3	58.9	27.2
6	Qb_1x^4	下马岭	77.20	10.92	0.50	1.09	0.51	3.04	2.16	0.29	2.58	101.5	539.7	53.2	79.6	38.4	132.0	4.5	68.3	142.6	1702.7	162.9	12.7	57.6	27.8
7	Qb_1x^4	下马岭	73.53	12.66	0.65	1.24	0.51	3.72	2.56	0.40	1.89	150.5	568.3	65.2	102.8	39.5	147.3	5.7	55.6	186.3	2049.8	197.2	17.6	83.4	30.4
8	Qb_1x^4	下马岭	73.09	11.99	0.90	1.33	0.57	3.37	4.01	0.32	1.45	111.3	585.2	77.8	103.1	38.9	171.8	14.8	52.8	174.1	2818.9	172.3	17.7	78.2	29.8
9	Qb_1x^4	下马岭	82.15	8.39	0.51	0.98	0.35	2.25	2.28	0.24	0.89	97.6	405.3	43.9	63.7	39.1	78.3	4.3	40.6	110.2	1043.9	115.5	12.0	50.3	17.5
10	Qb_1x^4	下马岭	75.06	10.41	1.40	1.15	0.74	2.95	3.56	0.28	1.14	1601.1	520.0	84.9	189.3	61.6	477.6	11.3	97.8	96.7	4313.7	155.1	14.3	52.6	39.6
11	Qb_1x^4	下马岭	75.48	11.34	0.92	1.14	0.56	3.31	2.49	0.33	1.42	111.5	529.3	78.2	89.9	31.7	162.9	9.1	64.3	129.1	2743.0	177.2	12.7	52.8	33.3
12	Qb_1x^3	下马岭	78.22	9.40	0.99	0.99	0.26	2.55	3.56	0.20	1.63	218.2	508.4	90.7	146.9	43.5	114.0	11.2	106.4	54.2	1285.1	153.4	11.7	33.5	34.4
13	Qb_1x^3	下马岭	85.23	6.89	0.31	0.67	0.20	1.86	1.91	0.13	0.21	133.7	341.4	33.4	18.6	37.9	25.9	8.8	24.3	29.6	419.1	90.4	9.2	13.9	14.5
14	Qb_1x^3	下马岭	87.89	4.74	0.34	0.54	0.18	1.20	1.80	0.10	0.30	116.8	566.5	48.7	10.0	36.2	10.7	12.3	21.5	22.7	496.3	64.4	5.4	5.4	12.5
15	Qb_1x^3	下马岭	73.89	12.40	0.65	1.49	0.34	3.25	3.38	0.31	0.64	111.1	466.8	55.0	62.0	35.9	48.5	9.4	28.0	74.9	1226.2	153.3	14.9	46.5	24.2
16	Qb_1x^3	下马岭	70.47	13.28	1.44	1.45	0.35	3.60	3.04	0.39	1.65	103.3	474.3	96.3	95.3	54.8	66.4	8.9	36.8	107.5	2661.2	187.6	16.6	72.7	42.4
17	Qb_1x^3	下马岭	82.31	7.38	0.32	1.47	0.24	1.57	3.79	0.21	0.46	109.3	268.2	46.5	39.9	31.9	58.6	11.7	30.3	49.9	526	78.5	11.5	33.1	16.1
18	Qb_1x^2	下马岭	64.93	14.96	0.58	2.23	0.35	3.87	7.43	0.43	0.16	247.5	413.6	51.4	14.0	37.3	53.9	24.1	27.9	114.1	315.5	175.5	15.3	62.4	23.7
19	Qb_1x^2	下马岭	63.50	18.20	0.38	1.06	0.29	4.34	5.35	0.48	0.05	113.3	516.7	57.5	21.6	44.6	197.0	21.8	24.4	109.7	138.1	188.7	21.8	79.1	26.4
20	Qb_1x^2	下马岭	76.43	10.83	0.49	1.51	0.36	2.64	3.67	0.36	0.03	120.1	411.6	37.5	24.3	22.9	65.9	9.6	28.6	78.5	534.0	127.3	13.4	49.5	20.1
21	Qb_1x^2	下马岭	73.14	11.38	0.41	2.16	0.39	2.77	5.46	0.37	0.11	143.8	413.3	31.4	21.2	30.8	142.1	20.8	28.8	83.2	282.7	124.4	14.8	53.1	16.3
22	Qb_1x^2	下马岭	37.98	8.13	17.67	7.67	0.38	2.31	6.91	0.27	0.25	8707.7	242.0	68.2	15.5	51.2	36.1	25.6	15.0	46.6	236.8	90.3	11.0	26.3	31.0
23	Qb_1x^1	下马岭	63.95	19.12	0.31	0.67	0.27	4.64	4.08	0.59	0.26	107.0	521.3	54.8	20.7	30.0	66.3	13.5	17.2	129.3	149.0	190.9	23.0	84.1	27.7
24	Qb_1x^1	下马岭	65.11	19.34	0.30	0.47	0.33	4.63	2.52	0.708	0.32	93.5	474.6	57.9	38.6	20.5	5.4	8.7	16.8	150.5	145.8	193.2	20.8	85.4	30.3
25	Qb_1x^1	下马岭	62.31	20.21	0.32	0.55	0.37	5.09	3.43	0.61	0.45	95.7	608.2	76.4	47.9	40.3	47.8	10.6	21.8	145.4	157.9	190.1	25.3	99.4	30.0
26	Qb_1x^1	下马岭	65.20	19.53	0.29	0.43	0.40	4.76	2.23	0.72	0.42	91.7	522.3	60.8	25.9	28.2	29.4	4.8	12.3	162.3	147.4	202.7	23.4	103	31.2
27	Qb_1x^1	下马岭	63.44	19.42	0.39	0.60	0.35	4.38	3.98	0.70	0.51	145.1	489.2	76.0	54.8	34.6	25.5	13.3	28.1	171.6	150.6	201.3	21.3	100	28.9
28	Qb_1x^1	下马岭	63.95	19.06	0.32	0.62	0.29	4.30	4.26	0.56	0.44	214.6	526.6	60.9	43.5	16.2	49.1	18.3	23.6	165.6	134.8	196.3	21.0	99.7	28.0

续表 1

序号	层位	剖面位置	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TFe	TiO_2	TOC	Mn	Ba	Sr	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	V	P	Zr	Ga	Cr	Y
			(%)									($\times 10^{-6}$)													
29	Qb_1x^1	下马岭	63.03	19.45	0.30	0.59	0.37	4.66	5.37	0.75	0.33	199.0	465.7	73.8	37.3	42.7	35.8	15.8	15.5	140.9	148.0	221.2	25.4	96.1	34.7
30	Qb_1x^1	下马岭	62.01	20.21	0.29	0.54	0.33	5.18	4.15	0.69	0.54	200.4	524.4	78.7	47.8	40.2	43.9	14.8	18.9	166.4	169.0	210.2	26.6	117	35.6
31	Qb_1x^1	下马岭	62.19	19.18	0.39	0.90	0.27	4.07	5.03	0.46	0.16	161.0	645.8	75.8	26.8	47.2	41.9	15.7	16.6	100.2	350.0	249.9	22.0	54.5	35.4
32	Qb_1x^1	下马岭	61.74	19.87	0.39	0.75	0.32	4.70	4.72	0.50	0.26	387.4	728.7	93.3	26.9	65.0	42.8	18.0	19.8	108.7	184.9	252.3	22.9	76.6	34.6
X1	Qb_1x^3	下花园	90.67	5.96	0.88	1.40	0.13	1.73	1.87	0.13	1.24	107.2	324.3	29.6	21.9	Nd.	36.5	4.4	9.8	31.1	806.5	67.5	6.5	22.2	13.6
X2	Qb_1x^3	下花园	86.22	9.94	0.70	1.62	0.23	3.28	2.43	0.31	1.94	122.9	402.2	51.1	38.3	2.4	51.2	7.6	16.0	64.5	826.6	124.3	13.4	44.5	21.5
X3	Qb_1x^3	下花园	85.50	8.62	1.82	1.61	0.28	2.51	2.43	0.25	6.25	132.7	500.4	68.4	91.0	5.0	53.9	6.3	60.4	53.7	1828.4	117.8	10.1	35.0	28.2
X4	Qb_1x^3	下花园	91.09	5.87	0.70	1.21	0.21	1.69	1.86	0.13	0.82	452.3	494.3	32.5	11.5	Nd.	29.9	7.8	32.6	31.5	773.6	71.3	5.6	20.4	15.4
X5	Qb_1x^3	下花园	90.32	7.16	0.47	1.25	0.27	2.22	2.05	0.20	3.36	127.0	355.9	39.4	20.1	6.3	35.6	4.2	17.9	45.8	616.2	89.0	10.2	32.8	15.7
X6	Qb_1x^3	下花园	85.46	9.64	1.13	1.47	0.55	3.23	2.56	0.33	1.80	129.2	613.5	69.8	201.7	10.1	256.3	7.0	93.2	140.0	2064.4	151.8	12.6	60.7	29.8
X7	Qb_1x^3	下花园	84.35	9.11	1.65	1.46	0.72	3.03	2.87	0.31	2.38	139.0	848.1	92.2	153.2	20.8	329.9	7.5	154.8	242.9	2744.9	135.0	12.6	121	32.7
X8	Qb_1x^3	下花园	83.53	9.80	1.64	1.47	0.59	3.17	3.04	0.34	3.90	126.5	888.8	141	210.4	15.2	373.9	8.2	168.9	228.0	3429	156.6	12.5	108	39.2
X9	Qb_1x^3	下花园	80.72	11.32	0.95	1.84	0.30	3.61	3.34	0.36	16.5	152.7	464.7	56.7	121.9	13.8	97.0	8.8	61.4	90.0	1721.1	153.9	12.9	61.5	33.2
X10	Qb_1x^3	下花园	89.07	7.56	0.69	1.39	0.18	2.25	2.26	0.22	11.9	129.2	374.9	32.6	45.9	2.4	77.8	4.9	30.3	54.1	905.8	98.5	9.6	36.5	25.9
X11	Qb_1x^3	下花园	90.69	5.54	1.14	1.36	0.21	1.66	1.89	0.15	0.56	122.4	312.5	45.5	15.3	6.7	103.3	5.3	12.6	33.2	522.9	70.9	8.0	24.0	13.3
X12	Qb_1x^3	下花园	90.12	6.89	1.02	1.28	0.16	1.83	1.80	0.21	0.73	115.9	367.6	57.9	39.5	7.1	63.0	3.0	29.8	44.0	1059.2	96.8	7.2	27.9	22.9
X13	Qb_1x^3	下花园	72.03	13.72	5.88	2.75	0.57	4.82	1.40	0.10	2.85	416.8	128.3	106	3.0	6.7	15.1	3.9	Nd.	11.2	1219.6	38.9	2.6	17.2	35.3
X14	Qb_1x^3	下花园	72.86	10.66	1.05	1.96	0.50	2.66	2.14	0.29	3.87	153.7	1116	35.1	130.0	55.1	874.6	5.4	179.7	208.0	2248.0	132.8	11.9	94.7	26.5
X15	Qb_1x^4	下花园	75.05	13.81	2.05	2.58	0.23	5.19	4.39	0.45	0.35	261.5	552.0	75.7	35.3	26.5	61.2	13.4	46.2	103.6	770.9	184.4	19.6	80.7	27.6
X16	Qb_1x^4	下花园	16.45	3.35	47.20	1.27	0.08	3.11	2.21	0.31	0.09	537.6	168.4	279	15.7	3.3	19.9	6.7	8.1	38.9	235.3	67.3	7.2	33.2	18.9
X17	Qb_1x^4	下花园	9.49	1.22	58.10	1.27	0.08	0.78	2.07	0.10	0.15	876.9	109.7	143	4.8	6.7	24.6	5.3	Nd.	11.4	23.6	48.5	1.8	16.0	53.3
X18	Qb_1x^4	下花园	85.36	10.17	0.87	1.85	0.29	3.21	3.23	0.35	0.13	137.3	475.6	47.7	9.2	4.9	44.4	8.5	20.3	70.2	1381.9	194.7	11.7	31.0	18.5
X19	Qb_1x^4	下花园	80.08	9.02	3.76	1.35	0.06	2.81	2.53	0.37	4.41	168.1	567.5	100	266.7	23.4	131.2	5.9	101.9	158.5	6740.2	132.5	10.6	85.9	49.7
X20	Qb_1x^4	下花园	8.97	1.18	58.88	1.29	0.16	0.70	1.40	0.10	0.22	416.8	128.3	106	3.0	6.7	15.1	3.9	Nd.	11.2	25.8	38.9	2.6	17.2	35.3
X21	Qb_1x^4	下花园	80.44	8.78	0.30	1.11	0.11	1.62	1.70	0.23	1.56	158.0	355.2	57.5	97.1	6.9	9.4	2.5	29.6	85.7	696.0	94.9	10.0	42.7	30.7
X22	Qb_1x^4	下花园	77.87	10.04	0.47	0.91	0.25	2.08	2.03	0.28	2.48	121.5	398.6	79.0	128.6	12.2	45.7	6.8	37.7	64.1	1432.9	124.0	11.0	64.1	30.7
X23	Qb_1x^3	下花园	70.27	8.78	0.95	4.14	0.66	1.90	5.66	0.23	0.73	319.4	650.7	40.6	11.3	20.5	40.2	15.5	17.5	29.9	581.5	133.3	9.6	29.9	17.2
X24	Qb_1x^2	下花园	72.87	15.24	0.63	2.42	0.14	5.62	0.91	0.50	0.16	193.6	542.2	25.8	15.5	7.0	69.0	17.0	18.0	81.4	187.2	198.4	21.2	81.4	27.2
X25	Qb_1x^3	下花园	69.63	16.71	0.56	2.74	0.60	6.06	0.62	0.49	1.67	234.1	537.5	61.5	44.4	22.9	102.0	15.7	27.6	111.6	428.4	168.7	21.3	111	25.8

注:所有样品的常量及微量元素分析在中国科学院兰州地质研究所用 3080E3X 射线荧光光谱仪完成,有机质(TOC)分析在 CS-144 碳硫测定仪完成。Nd.—低于检测限。

剖面发现该套黑色页岩中含有大量呈纹层状分布的隐晶质 SiO_2吻合，说明其形成时盆地中有大量溶解 SiO_2的输入。

在 (SiO_2/Al_2O_3)—$[(CaO+Na_2O)/K_2O]$二元图解中(图2)，正常沉积岩不同类型之间岩石化学组成可以用一条封闭的曲线划分出彼此的界线，如封闭曲线内的●A 代表砂岩分布区域和平均值，其余依此类推。本区不同类型富有机质沉积岩岩石化学成分之间没有明显的界线，除了个别落在正常沉积岩区内，其他则是相互重叠过渡，这意味着富有机质沉积岩在物质来源上与正常沉积有所不同。另外，本区富有机质沉积岩化学成分与红海海底热水沉积物和中条山铜矿热水沉积岩分布特征相似(孙海田等，1990)，表明它们可能有类似的成因。

从 SiO_2和 TOC 关系图(图3a)中不难发现，有机质含量(TOC)大于0.5%的岩石，其中的 SiO_2含量基本都大于65%，平均值变化于73.21%～82.68%之间，且 SiO_2/Al_2O_3的比值与 TFe/TiO_2的比值成正比关系，SiO_2含量与 TiO_2含量成负相关关系；有机质含量大于0.5%的岩石，其 TiO_2含量分布集中，主要分布在0.13%～0.45%之间，平均值为0.32%；有机质含量低的岩石，其 TiO_2含量分布范围宽，平均值为0.41%，总体上二者有负相关关系。Si/(Si+Al+Fe)比值变化于0.67～0.95之间，其与 TOC 成正相关关系(图3b)。从下马岭剖面上看，SiO_2含量与典型的陆源组分 TiO_2含量变化规律相反(图4)。

2.2 微量元素

从主要微量元素分析结果来看(表1)，富有机质沉积岩中的 P、Cu、Zn、Co、Ni、V、Rb 等元素含量较上陆壳的丰度(Taylor，1985；黎彤，1992)明显富集。Ba/Sr 比值变化于4.9～31.8之间，平均值为9.7。据已有研究成果表明，P、Cu、Zn、Co、Ni、V、Rb 等元素在硅质岩和硅质泥质岩中的显著富集，往往与海底热水流体活动有直接的关系(Marchig et al.，1982；Adachi et al.，1986；葛朝华等，1987；杜乐天，1996；孙省利等，2000；周永章等，2000)。说明该富有机质沉积岩—泥质岩+硅质岩在沉积过程中有海底热水流体的参与。

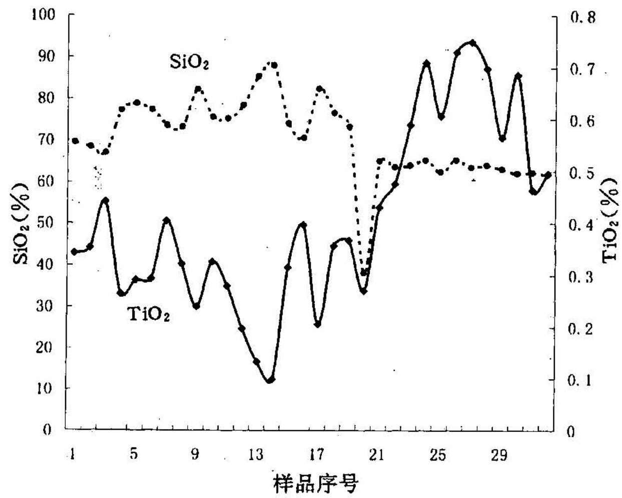

图4 SiO_2和 TiO_2含量剖面变化图

Fig. 4 The variational trend of SiO_2 and TiO_2 in profile (1～29 stands for serial number of samples)

从有机质与微量元素之间的关系可见(图5)，富有机质沉积岩中的有机质含量(TOC)与微量元素

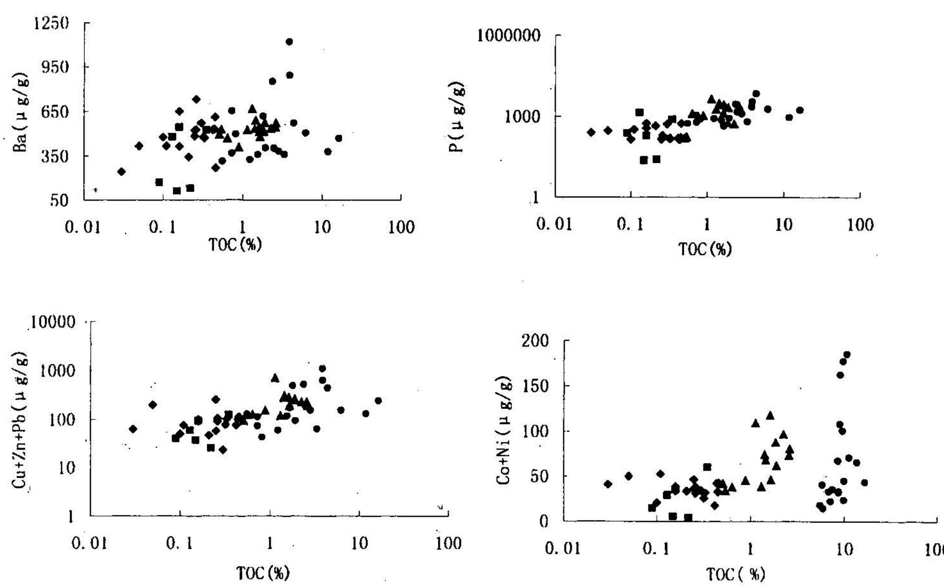

图5 TOC 与微量元素之间的关系

Fig. 5 The diagram of TOC vs. trace elements

▲—下马岭，TOC>0.5%；◆—下马岭，TOC<0.5%；●—下花园，TOC>0.5%；■—下花园，TOC<0.5%

▲—Xiamaling，TOC>0.5%；◆—Xiamaling，TOC<0.5%；●—Xiahuayuan，TOC>0.5%；■—Xiahuayuan，TOC<0.5%

及其组合 P、Cu、Zn、Co、Ni、V、Ba 及 Co＋Ni、Cu＋Pb＋Zn 成正相关关系;而与陆源元素 Ga、Zr 成负相关关系。

在下马岭剖面上,相对富集的微量元素与有机质(TOC)及典型陆源元素显示出规律性的变化。从下马岭组底部向上,在 Qb_1x^3 岩性段开始发生转折性的变化,有机质含量和富集的微量元素向上逐渐增高,而陆源元素的变化正好与之相反(图6)。

3 沉积地球化学指示的海底热水活动信息

在北京青白口系下马岭组剖面上,有机质(TOC)、常量元素和微量元素含量出现规律性变化,表明盆地在拉张时,沉积物中有大量海底热水流体参与沉积作用的痕迹。从 Qb_1x^3 岩组开始向上,沉积物中有大量富有机质的纹层—薄层状硅质岩出现,随之 TOC 和与热水流体活动有关的微量元素含量也急剧增高。要形成大量的硅质沉积,必须有大量且稳定的溶解 SiO_2 来源。海洋中溶解的 SiO_2 含量一般很低,常为0.16～0.18 mmol/kg(Fyfe et al.,1978; Von Damm et al.,1985a,1985b),很难达到形成 SiO_2 沉淀的程度。而现代海底热水流体活动调查发现,流体中 SiO_2 含量很高,一般为9.3～21.9 mmol/kg(Von Damm et al.,1985a,1985b),且在热水流体活动区有大量的非晶质 SiO_2 沉淀和繁盛的微生物群落(Haymon et al.,1993;Pichler et al.,1996,1999;Heikoop et al.,1996;Sedwick et al.,1996;Marani et al.,1997)。

Si/(Si＋Al＋Fe)比值可提供岩石中生物和热液成因 SiO_2 含量与陆源物质参与的信息,低的比值说明沉积岩形成时距离陆源区较近(Rangin et al.,1981;Aitchison et al.,1990)。本区富有机质沉积层段的 Si/(Si＋Al＋Fe)比值集中分布在0.7～0.9之间,并与 TOC 成正相关关系,暗示着其沉积时期,沉积环境远离陆源区,且有海底热水流体活动。

Ba、Sr 是化学性质相似的碱土金属元素,不仅可以用 Ba/Sr 比值的变化来判断海、陆相沉积物,而且可作为衡量海底热水流体作用的尺度,在海相沉积岩中的 Ba/Sr 比值愈大,愈能反映海底热水流体作用影响的程度(葛朝华等,1987)。本区富有机质沉积物中 Ba/Sr 比值分布在5.6～31.8之间,远远大于1,说明其沉积时海底热水流体活动强烈。

P、Cu、Zn、Co、Ni、V 等微量元素往往是海底热水沉积物中的富集元素,尤其是生命元素 P。下马岭组富有机质层段中 P、Cu、Zn、Co、Ni、V 等微量元素不但与有机质成正相关,而且与热水流体输入的

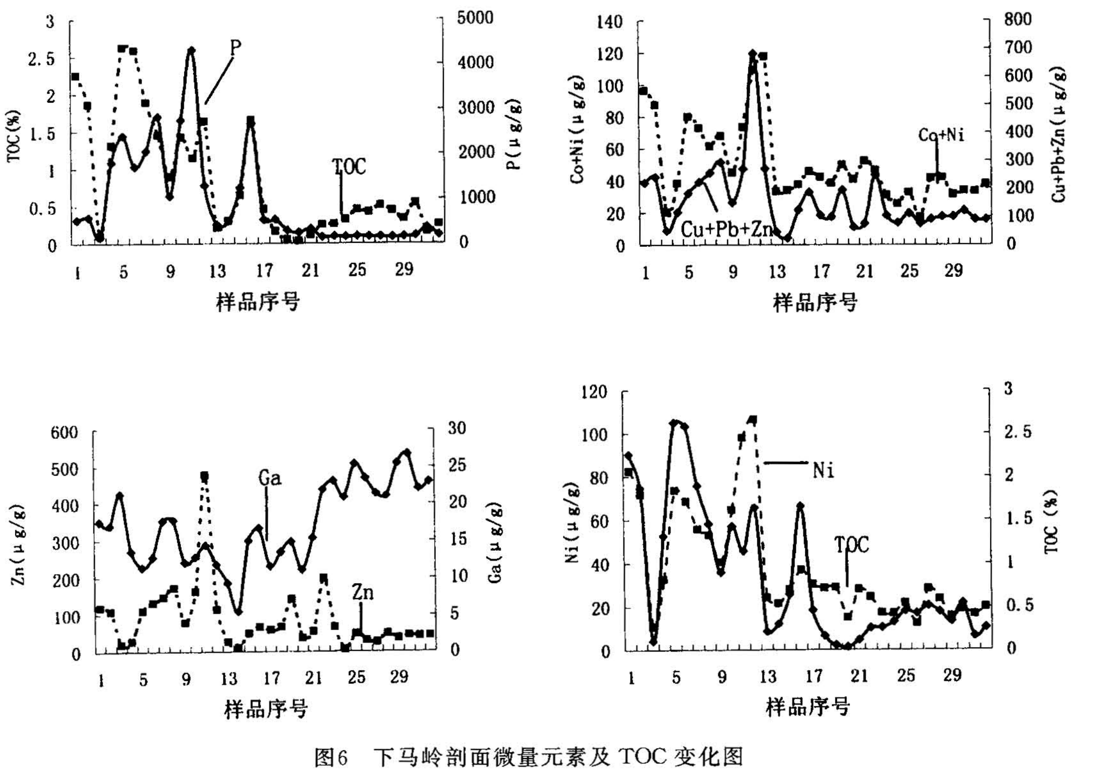

图6　下马岭剖面微量元素及 TOC 变化图

Fig. 6　The diagram of trace elements vs. TOC in Xiamaling profile

SiO_2也成正相关，这进一步说明有机质的富集与海底热水流体活动有关。

海底热水流体不但能为生物活动提供生命活动所需的N、P、K、C、S等元素，而且还能为生命活动提供能量。已有的研究和调查结果证明，海底热水流体活动区微生物繁盛，微生物又能从热水中摄取P、Cu、Zn、Co、Ni、V等微量元素使之富集；还原—酸性的热水流体进入海底，又能使海底形成缺氧环境，有利于生物死亡后的保存，最终导致海底热水流体活动区沉积物中TOC和微量元素双高的特征出现。

4 结论

（1）下马岭组富有机质沉积层段中TOC与海底热水流体输入的SiO_2含量成正相关，而与陆源输入的TiO_2成负相关。

（2）TOC与热水流体的前缘元素Ba及其微量元素P、Cu、Zn、Co、Ni、V等成正相关，与陆源元素成反比。陆源输入较大时，沉积物中的TOC低，当海底热水流体输入较大时，TOC则明显增高。

（3）下马岭组富有机质沉积层段中TOC和微量元素双高的特征与海底热水流体活动及海底嗜热生物群落活动息息相关。

参 考 文 献

陈先沛，高计元，陈多福. 1992. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志. 沉积学报，10(3)：124～132.

杜乐天. 1996. 烃碱流体地球化学原理—重论热液作用和岩浆作用. 北京：科学出版社，342～391.

葛朝华，韩发. 1987. 广东大宝山矿床喷气—沉积成因地质地球化学特征. 北京：北京科学技术出版社，26～29.

林丽. 2001. 尔金矿生物—有机质成矿. 矿物岩石地球化学通报，20(2)：79～83.

黎彤. 1992. 地壳元素丰度的若干统计特征. 地质与勘探，28(10)：1～7.

孙海田，葛朝华. 1990. 中条山式热液喷气成因铜矿床. 北京：北京科学技术出版社，10～50.

孙省利. 1999. 西成铅锌矿田有机地球化学特征及成矿作用. 甘肃地质学报，18(2)：58～64.

孙省利，高兆奎，魏晓辉，曾允孚. 2000. 西成铅锌成矿带泥盆系硅质岩地质地球化学特征与热水沉积成矿. 西北地质，33(2)：1～7.

涂光炽，等. 1988. 中国层控矿床地球化学(第三卷). 北京：科学出版社，255～311.

解启来，陈多福，陈先沛. 1999. 贵州松桃锰矿沉积有机质特征研究. 沉积学报，17(2)：280～284.

曾允孚，夏文杰. 1986. 沉积岩石学. 北京：地质出版社，132～134.

周永章，刘建明，陈多福. 2000. 华南古海洋热水沉积作用研究概述及若干认识. 矿物岩石地球化学通报，19(2)：114～118.

References

Adachi M, Yamamoto K, Suigiaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern pacific: Their geological significance as indication of ocean ridge activity. Sedimentary Geology, 47(1/2):125～148.

Aitchison J C, Flood P G S. 1990. Geochemical constraints on the depositional setting of palaeozoic cherts from the New England orogen, NSW, eastern Australia. Marine Geology, 94:79～95.

Chen Xianpei, Gao Jiyuan, Chen Duofu. 1992. The concept of hydrothermal sedimentation and indicators of petrology. Acta Sedimentologica Sinica, 10(3):124～132(in Chinese with English abstract).

Corliss J B, Baross J A, Hoffman S E. 1981. An hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on Earth. Oceanol. Acta, 4:59～69.

Duhig N C, Davidson G J, Stolz J. 1992. Microbial involvement in the formation of Cambrian sea-floor silica-iron oxide deposits, Australia. Geology, 20: 511～514.

Fyfe W S, et al. 1978. Fluids in the Earth's Crust. New York: Elsevier, 1～383.

Haymon R M, Koski R A, Sinciclar C. 1984. Fossile of hydrothermal vent worms from Cretaceous sulfide ores of The Samail ophiolite, Omen. Science, 233:1407～1409.

Haymon R M, Fornari D J, Von Damm K L, et al. 1993. Volcanic eruption of the mid-ocean ridge along the East Pacific Rise crest at 9°45′～ 52′N: Direct submesible observations of seafloor phenomena associated with an eruption event in April, 1991. Earth Planetary Science Letter., 119:85～101.

Heikoop J M, Tsujita C J, Risk M J, Tomascik T. 1996. Corals as proxy recorders of volcanic activity: evidence from Banda Api, Indonesia. PALAIOS, 11:286～292.

Jannasch H W, Mottl M J. 1985. Geomicrobiology of deep-sea hydrothermal vents. Science, 229: 717～725.

Lin Li. 2001. The mineralization of organism and organic matter in the Laerma gold deposit. Bulleton of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(2):79～83(in Chinese with English abstract).

Li Tong. 1992. The statistical characteristics of the abundance of chemical elements in the Earth's crust. Geology and Prospecting, 28(10):1～7(in Chinese with English abstract).

Marani M P, Gamberi F, Savelli C. 1997. Shallow-water polymetallic sufide deposits in the Aeolian island arc. Geology, 25:815～818.

Marchig V, Gundlach H, Moller P, Schley F. 1982. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. Marine Geology, 50(3): 241～156.

Pichler T, Dix G R. 1996. Hydrithermal venting within a coal reef ecosystem, Ambitle Island, Papua New Guinea. Geology, 20:435～438.

Pichler T, Veizer J, Hall G E M. 1999. The chemical composition of shallow-water hydrothermal fluids in Tutum Bay, Ambitle Island, Papua New Guinea and their effect on ambient sea water. Marine Chemistry, 64:229～252.

Rangin C, Steinberg M, Bonnot-Courtois C. 1981. Geochemistry of Mesozoic bedded cherts of central Baja California (Vizoaino-Cedros-San Benito): implications for paleogeogrphic reconstruction of an old oceanic basin. Earth Planet. sci. Lett., 54:313～322.

Rona P A. 1984. Hydrotermal mineralisation at seafloor spreading centers. Earth Sci. Rev., 20:1～104.

Sedwick P, Stuben D. 1996. Chemistry of shallow submarine warm spring in an arc-volcanic setting: Vulcano Island, Aeolian Archipelago, Italy. Marine Chemistry, 53:146~161.

Shanks W C Ⅲ, Bischoff J L. 1980. Geochemistry, sulfur isotope composition, and accumlation rates of Red Sea geothermal deposits. Economic Geology, 75:445~459.

Sun Haitian, Ge Chaohua. 1990. Zhongtiaoshan style sedimentary exhalative copper deposits. Beijing, Beijing Science and Technology Press, 10~50(in Chinese).

Sun Xingli. 1999. Organic geochemical characters and metallogenesis of Xicheng Pb—Zn ore field, Gansu, China. Acta Geologica Gansu, 18(2):58~64(in Chinese with English abstract).

Sun Xingli, Gao Zhaokui, Wei Xiaohui, Zeng Yunfu. 2000. Geological and geochemical characteristics of Devonian chert from Xicheng lead—zinc ore belt and hot water sedimentary oreformation. Northwestern Geology, 33(2)1~7(in Chinese with English abstract).

Taylor S R. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. London: Blackwell, 57~72.

Tissot B P, Welet D H. 1984. Petroleum Formation and Occurrence. Belin: Springer-verlag.

Trewin N H, Knoll A H. 1999. Preservation of Devonian chemotrophic filamentous bacteria in calcite veins. PALAIOS, 14: 288~294.

Von Damm K L, Edmond J M, Grant B, Measures C I. 1985a. Chemistry of submarine hydrothermal solution at 21°N, East Pacific Rise. Geochimica et Cosmochimica Acta, 49: 2197~2220.

Von Damm K L, Edmond J M, Measures C I, Grant B. 1985b. Chemistry of submarine hydrothermal solution at Guaymas Basin, Gulf of California. Geochimica et Cosmochimica Acta, 49:2221~2237.

Walsh M M, Lowe D R. 1985. Filamentous microfossils from the 3,500-Myr-old Onverwacht Group, Barberton Mountain Land, South Africa. Nature, 314: 530~532.

Walter M R, Desmarais D, Farmer J D, Hinman N W. 1996. Lithofacies and biofacies of mid-paleozoic thermal springs in the Drummond Basin, Queensland, Australia. PALAIOS, 11:497~518.

Xie Qilai, Chen Duofu, Chen Xianpei. 1999. Characteristics of sedimentary organic matter in Songtao manganese deposits, Guizhou. Acta Sedimentologica Sinica, 17(2): 280~284(in Chinese with English abstract).

Zeng Yunfu, Xia Wenjie. 1986. Sedimentary Petrology. Beijing: Geological Publishing House, 132~134(in Chinese).

Zhou Yongzhang, Liu Jianming, Chen Duofu. 2000. Thread and knowledge to fossil sea-floor hydrothermal sedimentation of South China. Bulleton of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 19(2):114~118(in Chinese with English abstract).

Hydrothermal Venting on the Seafloor and Formation of Organic-rich Sediments

——Evidence from the Neoproterozoic Xiamaling Formation, North China

SUN Xingli[1], CHEN Jianfa[1,2], LIU Wenhui[1], ZHANG Shuichang[3], WANG Darui[3]

1) *State Key Lab of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu*, 730000

2) *University of Petroleum, Beijing*, 102200

3) *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing*, 100083

Abstract

The Neoproterozoic Xiamaling Formation in the Yanliao depression consists mainly of black-gray shale, yellowish green shale, silty mudstone and cherts. In the black-gray shale, laminar and thin-bedded cherts are widely distributed. Samples systemically collected from the Xiamaling section in Beijing and Xiahuayuan section in Hebei Province are analyzed with the X-ray fluorescence spectrum and analysis of pyrolysis (Rock-Eval) instrument. The results shows that the content of SiO_2 in the organic—rich layers ranges from 69.63% to 91.09%, higher than in the normal mudstone, and is in direct proportion to the total organic carbon (TOC), but in inverse proportion to the contents of TiO_2, which is typical of terrigenous component. The elements of Pb, Zn, P, Co, Ni and V, which are related to hydrothermal venting on the seafloor, and are rich in the organic-rich sediments, and in direct proportion to TOC. The ratio of Ba/Sr in the organic-rich sediments ranges from 5.6 to 31.8, which suggests that hydrothermal venting on the seafloor was strong. In the Xiamaling section, laminar and thin-bedded cherts in shale increase in volume gradually from Qb_1x^3 to upper strata, along with a rapid increase in the content of TOC. The geology and geochemistry indicate that the basin was in strong extension and depression during the formation of the organic-rich sediments of the Xiamaling formation and hydrothermal venting followed with tectonism. Hydrothermal venting on the seafloor can supply nutrition for thermophile microorganism blooming in the area of hot water, and result in the formation of anoxia in bottom water beneficial for the preservation of organic matter.

Key words: Xiamaling Formation; hydrothermal venting; organic matter; marine sediments