

# 华北燕山东段下马岭组黑色岩系元素地球化学组成

## ——对其沉积作用的约束

陈超<sup>1</sup>, 魏文通<sup>1</sup>, 修迪<sup>1</sup>, 张运强<sup>1</sup>, 刘增校<sup>1</sup>, 代堰锬<sup>2</sup>, 朱玉娣<sup>3</sup>, 陈海燕<sup>1</sup>

(1. 河北省区域地质矿产调查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082;  
3. 西南石油大学, 四川 成都 610500)

**摘要:** 华北地区燕山东段下马岭组地层中发育一套黑色岩系, 本文测定了该岩系代表性岩石的地球化学组成。主微量元素分析结果显示, 样品主量元素含量变化较大(如  $\text{SiO}_2 = 53.00\% \sim 78.83\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.20\% \sim 17.57\%$ ); PAAS 标准化稀土配分型式为重稀土富集型, 具 Ce 负异常, 与现代海水配分型式一致。样品具有较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  含量(1.31%~18.48%), 其 U 含量(平均  $3.95 \times 10^{-6}$ )、Th/Sc 值(0.97~1.26)、Th/U 值(平均 3.50)、球粒陨石标准化稀土配分型式及大陆地壳标准化微量元素蛛网图表明黑色岩系沉积过程中有较多陆源碎屑物质的加入。黑色岩系 Ba/Sr 值(9.28~22.79)、Co/Zn 值(0.01~0.29)及相关图解显示其沉积过程明显受到海底热液作用的影响, 但原始溶液中热液组分含量不足 0.1%。主微量元素比值、Ce/Ce<sub>PAAS</sub><sup>\*</sup> 值(0.82~0.93)及构造背景判别图解表明黑色岩系可能沉积于大陆岛弧背景下的深水缺氧环境。

**关键词:** 黑色岩系; 海底热液; 地球化学; 下马岭组; 燕山地区

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)05-0685-12

## Geochemical features of the black rock series in Xiamaling Formation, eastern Yanshan area, North China: Constraints on its sedimentation

CHEN Chao<sup>1</sup>, WEI Wen-tong<sup>1</sup>, XIU Di<sup>1</sup>, ZHANG Yun-qiang<sup>1</sup>, LIU Zeng-xiao<sup>1</sup>, DAI Yan-pei<sup>2</sup>,  
ZHU Yu-di<sup>3</sup> and CHEN Hai-yan<sup>1</sup>

(1. Hebei Institute of Regional Geological and Mineral Resource Survey, Langfang 065000, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610082, China; 3. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** A black rock series occurs in Xiamaling Formation, eastern Yanshan area, North China. Major and trace element compositions of the representative rocks were analyzed in this paper. Five samples have varying major element oxides (e. g.,  $\text{SiO}_2 = 53.00\% \sim 78.83\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.20\% \sim 17.57\%$ ). Their PAAS-normalized REE patterns are HREE-enriched with positive negative Ce anomalies, which is the typical feature of modern seawater. These samples show high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  values (1.31%~18.48%); their U concentrations (averaging  $3.95 \times 10^{-6}$ ), Th/Sc ratios (0.97~1.26), Th/U ratios (averaging 3.50), and chondrite-normalized REE and continental crust-normalized trace element patterns indicate that terrigenous detrital materials significantly contributed to the deposition. The Ba/Sr ratios (9.28~22.79), Co/Zn ratios (0.01~0.29) and related diagrams show that the black rock series was evidently influenced by marine hydrothermal activities during its

收稿日期: 2014-11-13; 修订日期: 2015-07-30

基金项目: 中国地质调查局地质大调查资助项目(1212011220486)

作者简介: 陈超(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质矿产调查与研究工作, E-mail: chchgood@163.com。

precipitation. However, the proportion of hydrothermal fluid in original solution was less than 0.1%. The major and trace element ratios,  $Ce/Ce^*$  ratios (0.82~0.93) and tectonic discrimination diagrams also indicate that this black rock series was probably deposited in the deep-water anoxic environment of a continental arc setting.

**Key words:** black rock series; marine hydrothermal activity; geochemistry; Xiamaling Formation; Yanshan area

黑色岩系是富含有机质的海相细粒沉积岩的总称,多产于缺氧或贫氧的深部海水环境,是具有一定沉积学、古生态学和地球化学特征黑色细粒泥质岩层,主要包括深灰-黑色硅质岩、泥质岩及少量碳酸盐岩、沉积磷块岩与重晶石岩(Tyson, 1987)。该类岩系形成于特殊的沉积环境,且往往是烃源岩、稀有金属及贵金属富集层或矿源层。因此,近几十年来黑色岩系已引起国内外地质学界的广泛关注(Kessels *et al.*, 2003; Mutterlose *et al.*, 2009; 徐晓春等, 2009; Yu *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2011)。迄今为止,国内学者对中国黑色岩系的研究多集中于南方湘、黔、渝地区,且取得了一系列重要认识(李胜荣等, 1995; 吴朝东等, 1999; 杨剑等, 2005; 朱正杰等, 2011)。中国北方燕山地区下马岭组广泛出露一套以富含有机质为特征的海相黑色岩系,包括深色页岩、粉砂岩、硅质岩、粘土岩和少量碳酸盐岩等,是中国北方中元古界重要的生油层,许多石油地质学家做过多方面研究(王铁冠等, 1988; 王杰, 2002; 孙省利等, 2003; 陈践发等, 2004; 鲍志东等, 2004; 张水昌等, 2007; 刘岩等, 2011; 王作栋等, 2013)。本文选取燕山东段下马岭组黑色岩系为研究对象,拟采用岩石地球化学分析方法,探讨其物质来源、沉积环境及构造背景。

## 1 区域地质背景

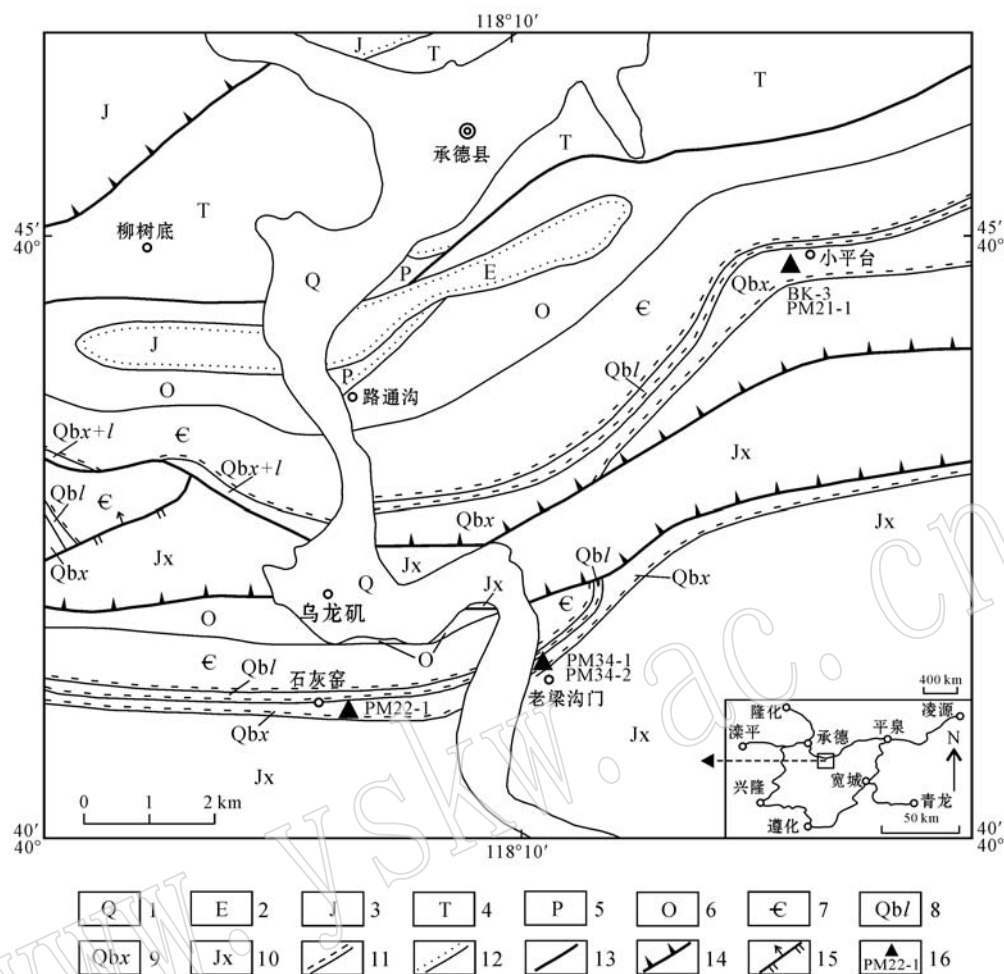
下马岭组主要分布于燕山地区和太行山北段,中元古代铁岭末期发生“芹峪运动”,华北北部上升成为陆地,形成大面积的古风化壳,造成下马岭组与下伏中元古代铁岭组呈不平行不整合接触(乔秀夫, 1976; 王鸿祯, 1999)。至下马岭期,华北北部稳定沉降,海水由东北侵入北华北,形成内陆海湾,沉积一套富含有机质的深色页岩,含黄铁矿结核,夹饼状泥灰岩等(王丽云等, 2009)。下马岭期后发生的“蔚县上升”被广泛认为代表一次强烈和长期的地壳抬升过程,导致下马岭组与上覆龙山组呈平行不整合接触(杜汝霖等, 1980)。区域上,下马岭组在燕山西段下花园、赵家山一带层序最完整、厚度最大,可划分

为5个岩性段:一段主要为暗色页岩、粉砂岩和少量白云岩;二段下部为黄绿色页岩、粉砂质泥岩与泥质粉砂岩薄层互层,上部为质纯的黄绿色泥岩;三段为黑灰色薄板状硅质岩、硅质页岩、棕色页岩互层;四段主要为黑色碳质泥岩夹硅质岩薄层;五段下部为浅灰色页岩,中、上部为黑色页岩(孙省利等, 2003; 陈践发等, 2004)。

本次研究区地理位置处于河北省承德县一带,隶属燕山地区东段(图1)。区内地层包括:①中新元古代长城系、蓟县系及青白口系,广泛出露于该区南部,岩性主要为一套厚度巨大的碎屑岩和海相富镁碳酸盐岩,地层序列清楚且基本未遭受变形变质作用影响,地层中发育大量古生物化石(邢裕盛等, 1996);②古生代寒武系、奥陶系与二叠系,多分布于研究区中部,岩性主要为一套浅海-潮坪相碳酸盐岩和少量河湖相碎屑岩;③中生代三叠系和侏罗系出露于研究区北部,主要为一套河湖相碎屑岩和成分复杂的陆相火山沉积地层。本区岩浆岩分布较少,仅在西北部侏罗纪地层发育。区内发育4条规模较大的北东向逆冲断层和3条性质不明断层。根据研究区内下马岭组岩石组合特征,将其划分为4个岩性段:一段以灰黑色、灰绿色页岩为主,下部夹含黄铁矿粉砂岩,样品BK-3取于该层位,整体可与燕山西段下马岭组一段和二段对比;二段为黑灰色、浅灰色粘土质硅质岩夹黑色、灰黑色页岩及少量黑色粉砂质粘土岩,与燕山西段下马岭组三段相当,样品PM21-1取于该段;三段由黑色碳质页岩、硅质页岩夹粘土质硅质岩、粉砂质粘土岩及少量透镜状粘土岩,和燕山西段下马岭组四段基本一致,样品PM34-1和PM34-2取于此;四段为灰黑色粘土质页岩、灰绿色页岩,相当于燕山西段下马岭组五段,取样品PM22-1(图2)。

## 2 样品特征与测试

本次工作从研究区石灰窑剖面、老梁沟门剖面及小平台剖面中选取下马岭组5件具代表性岩石样品,岩石新鲜无蚀变,且无脉体穿插(图1、图2)。样

图1 燕山地区承德一带地质略图(据朱更新等, 2000)<sup>①</sup>Fig. 1 Geological sketch map of Chengde, Yanshan area (after Zhu Gengxin *et al.*, 2000)<sup>①</sup>

1—第四系; 2—古近系; 3—侏罗系; 4—三叠系; 5—二叠系; 6—奥陶系; 7—寒武系; 8—青白口系长龙山组; 9—青白口系下马岭组; 10—蓟县系; 11—平行不整合界线; 12—角度不整合界线; 13—性质不明断层; 14—逆冲断层; 15—逆断层; 16—取样位置和编号  
1—Quaternary; 2—Paleogene; 3—Jurassic; 4—Triassic; 5—Permian; 6—Ordovician; 7—Cambrian; 8—Changlongshan Formation of Qiangbaikou System; 9—Xiamaling Formation of Qiangbaikou System; 10—Jixian System; 11—disconformity; 12—unconformity; 13—fault; 14—thrust fault; 15—reverse fault; 16—location and serial number of the sample

品 PM21-1 为粘土质硅质岩, 野外呈浅灰色, 层状产出(图 3a), 岩石主要由隐晶状玉髓(~65%)和隐晶-微鳞片状粘土矿物(~35%)组成, 后者局部相对富集呈斑点状产出(图 3b)。样品 PM34-1 为硅质页岩, 岩石呈黑色页片状、薄片状(图 3c), 主要由隐晶状玉髓(~80%)、陆源粉砂(~10%)、隐晶-微鳞片状粘土矿物(~10%)组成(图 3d)。样品 PM22-1 为粘土质页岩, 黑色页片状(图 3e), 岩石由隐晶-微鳞片状粘土矿物(~70%)、陆源粉砂(~10%)及尘点状碳质成分(~20%)组成(图 3f)。样品 PM34-2 为

灰色粘土岩, 呈透镜状产于黑色硅质页岩层间(图 3g), 岩石呈泥状结构, 主要由隐晶-微鳞片状的粘土矿物组成(图 3h)。样品 BK-3 为灰黑色含黄铁矿粉砂岩, 岩石富含黄铁矿, 表面可见金黄色黄铁矿晶体, 主要由粉砂与粒状或不规则状黄铁矿组成, 其中黄铁矿呈杂乱分布(图 3i)。

本次 5 件样品主微量元素分析在河北地矿局廊坊实验室完成。主量元素采用 XRF 法, 使用荷兰帕纳科公司研制的 Axios X 射线荧光光谱仪测定, 分析精度优于 2%; 稀土和微量元素采用美国赛默飞世尔

① 朱更新, 孙立新, 杨世有, 等. 2000. 承德市幅区域地质调查报告. 河北省地质调查院.

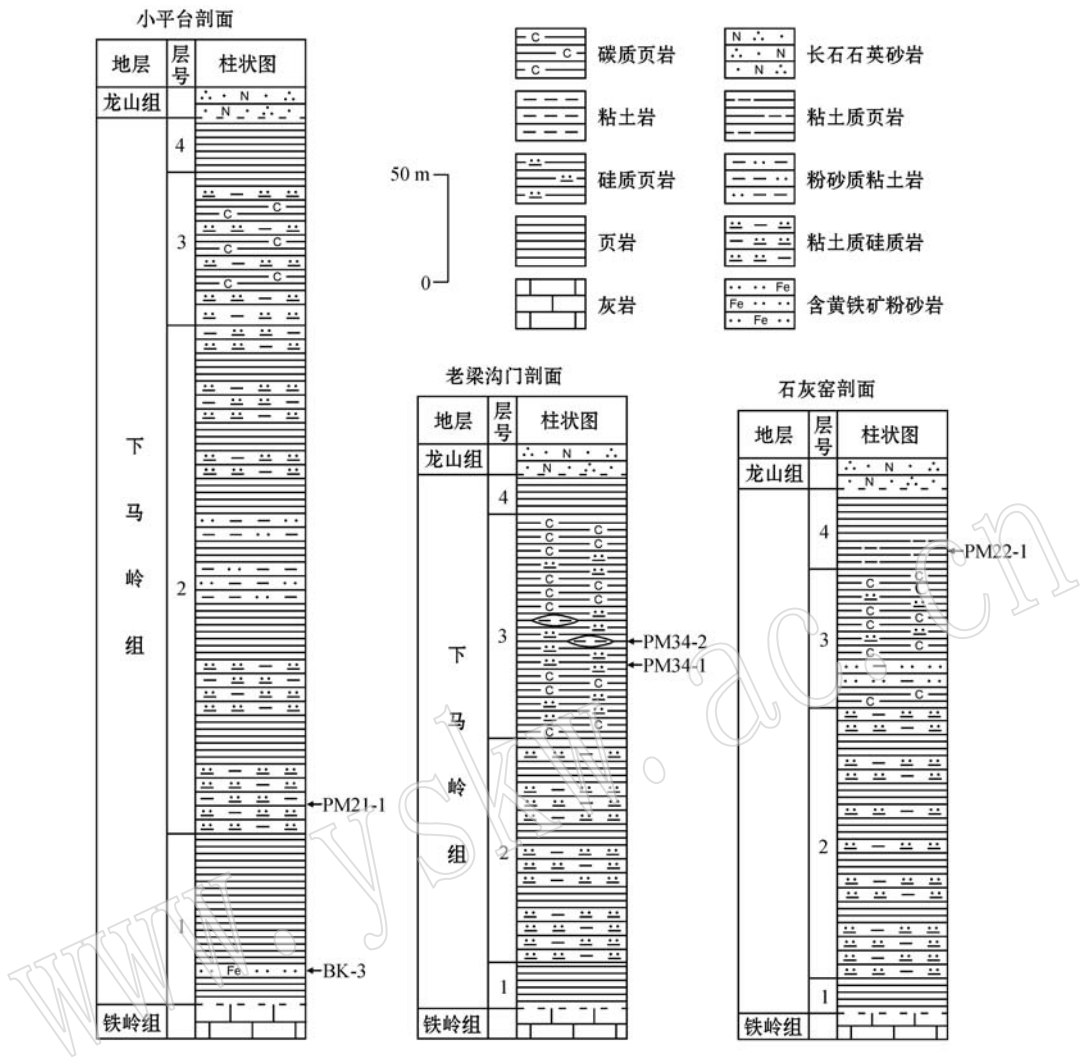


图 2 燕山地区承德一带下马岭组柱状剖面图

Fig. 2 Columnar section of Xiamaling Formation in Chengde, Yanshan area

科技公司(Thermo Fisher Scientific)研制的 X Series II 型等离子体光谱仪(ICP-MS)测定,分析精度优于 1%~5%。样品主微量元素分析结果列于表 1。

3 分析结果

3.1 主量元素

粘土质硅质岩、硅质页岩、粘土质页岩与粘土岩样品主要由 SiO<sub>2</sub> (62.44% ~ 78.83%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9.36% ~ 17.57%)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.73% ~ 3.65%)、FeO (0.29% ~ 2.90%)、MgO (1.28% ~ 4.64%) 及 K<sub>2</sub>O (2.64% ~ 5.90%) 组成,其他主量氧化物含量均低于 1%。含黄铁矿粉砂岩具有相当高的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (27.60%) 含量,其他氧化物含量较之页岩和粘土

岩样品相对偏低,且多数氧化物含量低于 1%,如 SiO<sub>2</sub> = 53.00%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1.20%,可能与样品中大量赋存的黄铁矿有关。

3.2 稀土元素

样品稀土元素总量为 25.39 × 10<sup>-6</sup> ~ 144.07 × 10<sup>-6</sup>,在球粒陨石标准化稀土元素配分图上(图 4a),REE 配分型式均显示为右倾型[(La/Yb)<sub>N</sub> = 2.20 ~ 6.64],且具有明显的 Eu 负异常(Eu/Eu<sub>N</sub><sup>\*</sup> = 0.59 ~ 0.81)。值得注意的是,本文所分析样品与下马岭组黑色岩系中的硅质岩[数据据杨红梅(2006),图中阴影部分]具有完全一致的稀土配分型式,且均与大陆地壳的配分型式大体相似(Taylor and McLennan, 1985)。在 PAAS (Post Archean Australian Shale) 标准化稀土元素配分图上 (McLennan, 1989)(图 4b),



表 1 燕山东段下马岭组黑色岩系主量( $w_B/\%$ )及微量( $w_B/10^{-6}$ )元素分析结果Table 1 Major ( $w_B/\%$ ) and trace ( $w_B/10^{-6}$ ) element content of black rock series in Xiamaling Formation, eastern Yanshan area

样号	PM21-1	PM34-1	PM22-1	PM34-2	BK-3	样号	PM21-1	PM34-1	PM22-1	PM34-2	BK-3
岩性	粘土质 硅质岩	硅质 页岩	粘土质 页岩	粘土岩	含黄铁矿 粉砂岩	岩性	粘土质 硅质岩	硅质 页岩	粘土质 页岩	粘土岩	含黄铁矿 粉砂岩
SiO <sub>2</sub>	78.83	68.74	73.27	62.44	53.00	(La/Yb) <sub>PAAS</sub>	0.51	0.59	0.41	0.24	0.73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.36	10.55	9.47	17.57	1.20	Ce/Ce <sub>PAAS</sub>	0.92	0.89	0.82	0.93	0.91
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.56	0.45	0.91	0.11	Ce <sub>anom</sub>	-0.02	-0.04	-0.07	-0.05	-0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.73	2.65	2.38	3.65	27.60	Co	4.12	5.15	4.10	1.72	14.37
FeO	1.65	2.90	0.29	0.64	0.25	Ni	27.71	51.01	50.50	3.24	38.04
CaO	0.47	0.57	0.83	0.19	0.12	Mo	0.36	2.50	17.73	0.69	3.75
MgO	1.90	4.64	1.28	1.70	0.04	Cu	5.42	51.33	66.15	3.99	19.36
K <sub>2</sub> O	2.65	2.64	2.74	5.90	0.24	Zn	24.24	864.20	105.90	21.29	50.03
Na <sub>2</sub> O	0.89	0.83	0.78	0.14	0.04	Ga	14.97	14.54	13.90	25.01	1.62
MnO	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	Tl	0.23	0.55	1.10	2.84	0.70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	0.16	0.63	0.02	0.01	Pb	7.56	9.99	17.64	454.10	165.50
LOI	2.73	5.38	7.73	6.66	17.21	Bi	0.05	0.25	0.62	0.66	0.23
Total	99.88	99.63	99.87	99.83	99.83	Li	28.00	57.94	18.46	29.08	6.36
La	21.48	26.47	24.15	13.53	5.12	Be	1.72	1.00	1.33	2.35	0.11
Ce	45.83	54.22	46.36	24.64	10.02	Sc	10.49	10.01	11.43	16.79	2.00
Pr	6.08	7.38	6.92	2.73	1.25	Cr	32.27	49.01	36.21	42.45	8.30
Nd	23.27	29.58	28.36	9.78	4.70	Rb	98.89	71.33	116.84	228.50	11.27
Sm	4.73	5.93	5.97	2.46	0.96	Sr	30.45	52.38	33.86	22.74	5.11
Eu	0.88	1.24	1.42	0.68	0.18	Zr	117.40	153.00	109.30	227.80	82.60
Gd	4.08	5.22	5.42	2.67	0.86	Cs	1.66	1.85	4.77	11.61	0.69
Tb	0.74	0.88	1.03	0.67	0.15	Nb	9.55	11.60	9.45	24.64	1.29
Dy	4.38	4.86	6.19	4.88	0.81	Ba	505.56	1 193.50	442.97	492.80	47.41
Ho	0.88	0.96	1.30	1.05	0.15	Hf	3.60	4.71	3.59	7.58	2.63
Er	2.73	2.87	3.97	3.39	0.47	Ta	0.77	0.97	0.95	2.10	0.13
Tm	0.49	0.51	0.68	0.62	0.09	W	1.47	1.25	1.51	3.11	0.29
Yb	3.08	3.30	4.31	4.15	0.52	Th	10.28	10.06	11.14	21.13	2.12
Lu	0.57	0.65	0.74	0.92	0.11	U	2.48	3.75	8.94	4.08	0.50
ΣREE	119.22	144.07	136.82	72.17	25.39	V	67.21	172.13	274.77	107.41	24.07
(La/Yb) <sub>N</sub>	4.70	5.41	3.78	2.20	6.64	V/(V+Ni)	0.71	0.77	0.84	0.97	0.39
Eu/Eu <sub>N</sub> *	0.60	0.67	0.75	0.81	0.59	Ni/Co	6.73	9.90	12.32	1.88	2.65

注: (La/Yb)<sub>N</sub> = La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>, Eu/Eu<sub>N</sub>\* = 2Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>), Ce<sub>anom</sub> = lg[3Ce<sub>N</sub>/(2La<sub>N</sub> + Nd<sub>N</sub>)], (La/Yb)<sub>PAAS</sub> = La<sub>PAAS</sub>/Yb<sub>PAAS</sub>, Ce/Ce<sub>PAAS</sub>\* = 2Ce<sub>PAAS</sub>/(La<sub>PAAS</sub> + Pr<sub>PAAS</sub>), (球粒陨石标准化值据 Taylor and McLennan, 1985; PAAS 标准化值据 McLennan, 1989)

本文样品与下马岭组黑色硅质岩均显示为重稀土富集型[(La/Yb)<sub>N</sub> = 0.41~0.73], 具有轻微的 Ce 负异常(Ce/Ce<sub>PAAS</sub>\* = 0.82~0.93)。

### 3.3 微量元素

本文 5 件样品部分微量元素具有较高含量, 如 Ni ( $3.24 \times 10^{-6} \sim 51.01 \times 10^{-6}$ )、Cu ( $3.99 \times 10^{-6} \sim 66.15 \times 10^{-6}$ )、Zn ( $21.29 \times 10^{-6} \sim 864.20 \times 10^{-6}$ )、Pb ( $7.56 \times 10^{-6} \sim 454.10 \times 10^{-6}$ )、Li ( $6.36 \times 10^{-6} \sim 57.94 \times 10^{-6}$ )、Cr ( $8.30 \times 10^{-6} \sim 49.01 \times 10^{-6}$ )、Rb ( $11.27 \times 10^{-6} \sim 228.50 \times 10^{-6}$ )、Sr ( $5.11 \times 10^{-6} \sim 52.38 \times 10^{-6}$ )、Zr ( $82.60 \times 10^{-6} \sim 227.80 \times 10^{-6}$ )、Ba ( $47.41 \times 10^{-6} \sim 1 193.50 \times$

$10^{-6}$ )、V ( $24.07 \times 10^{-6} \sim 274.77 \times 10^{-6}$ ), 其他微量元素含量多低于  $10 \times 10^{-6}$ 。U 含量介于  $0.50 \times 10^{-6} \sim 8.94 \times 10^{-6}$ , 平均  $3.95 \times 10^{-6}$ , 接近大陆地壳 U 含量  $3.2 \times 10^{-6} \sim 3.5 \times 10^{-6}$  (Nameroff *et al.*, 2002)。Th/Sc 比值为 0.97~1.26, 平均 1.06; Th/U 比值为 1.25~5.18, 平均 3.50, 二者均与大陆上地壳比值相近 (Th/Sc = 0.75~1.0, Th/U = 3.8) (McLennan and Taylor, 1991)。在大陆地壳标准化微量元素蛛网图上(图 4c), 样品显示出部分高场强元素(如 Nb、Ta 及 Ti)亏损, 但多数元素与大陆地壳元素丰度相当。

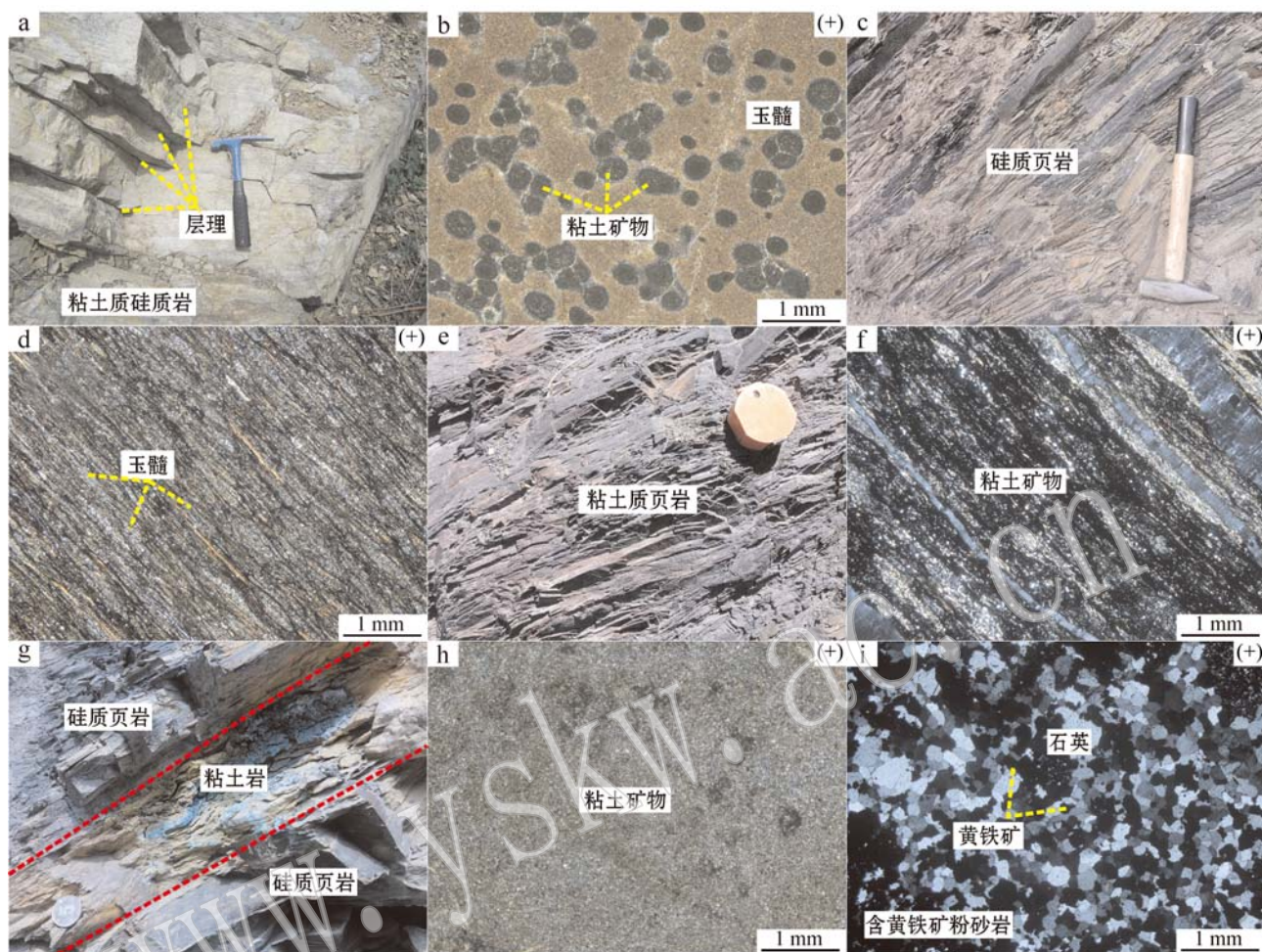


图3 燕山东段下马岭组黑色岩系样品野外及镜下特征(正交偏光)

Fig. 3 Field and microscopic (crossed nicols) characteristics of black rock series in Xiamaling Formation, eastern Yanshan area

a, b—粘土质硅质岩 PM21-1; c, d—硅质页岩 PM34-1; e, f—粘土质页岩 PM22-1; g, h—粘土岩 PM34-2; i—含黄铁矿粉砂岩 BK-3  
a, b—clayey siliceous rock PM21-1; c, d—siliceous shale PM34-1; e, f—clayey shale PM22-1; g, h—clay rock PM34-2; i—pyritic siltstone BK-3

## 4 讨论

### 4.1 物质来源

沉积岩  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{TiO}_2$  的含量高低常被用于判定陆源碎屑的贡献量(Kato *et al.*, 2002)。本文所测样品  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 = 1.31\% \sim 18.48\%$ , 平均 10.11; 其 U 含量、Th/Sc 及 Th/U 值亦与大陆地壳接近, 反映沉积时有较多陆源碎屑物质的加入。球粒陨石标准化稀土配分图显示黑色岩系与大陆地壳配分型式具有相似性(图 4a); 大陆地壳标准化微量元素蛛网图表明该岩系多数微量元素与大陆地壳丰度相当(图 4c), 暗示陆壳组分对该黑色岩系的沉积贡献巨大。

PAAS 标准化稀土元素配分图显示下马岭组黑色

岩系为重稀土富集型, 且具有轻微 Ce 负异常(图 4b)。这与现代海水的地球化学特征相似, 表明该黑色岩系沉积于海水中(Alibo and Nozaki, 1999)。此外, 海底热液在黑色岩系沉积时所起的重要作用已得到广泛认可(徐晓春等, 2009; Yu *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2011)。Smith 等(1983)及 Pete 等(1988)指出 Ba/Sr 值可以作为判别海底热液活动的标志: 正常海相沉积岩中 Ba/Sr 值小于 1; 海底热水沉积物中 Ba/Sr 值大于 1, 且 Ba/Sr 值越大表明海底热液作用越强。本区黑色岩系中 Ba/Sr 值为 9.28~22.79, 暗示黑色岩系沉积时海底热液活动强烈。Toth(1980)认为热液沉积物 Co/Zn 值比较低, 平均 0.15; 其他铁锰结核一般在 2.5 左右。本文黑色岩系 Co/Zn 为 0.01~0.29, 平均 0.12, 亦反映了热水沉积作用特征。基于本文所测数据及

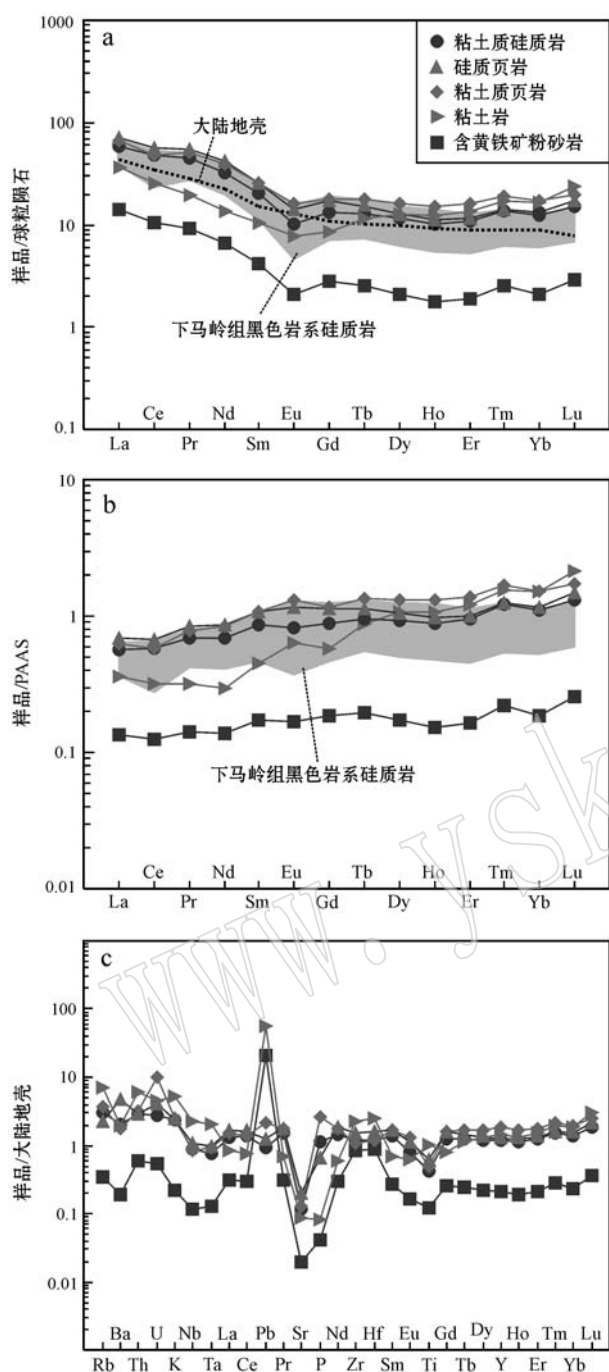


图4 燕山东段下马岭组黑色岩系球粒陨石与PAAS标准化稀土元素配分图(a,b)及大陆地壳标准化微量元素蛛网图(c)(球粒陨石及大陆地壳标准化值据 Taylor and McLennan, 1985; PAAS标准化数据据 McLennan, 1989; 下马岭组中黑色硅质岩数据引自杨红梅, 2006)

Fig. 4 Chondrite (a) and PAAS (b)-normalized REE patterns and continental crust-normalized trace element pattern (c) of black rock series in Xiamaling Formation, eastern Yanshan area (chondrite and crust normalized values after Taylor and McLennan, 1985; PAAS normalized values after McLennan, 1989; values of black cherts in Xiamaling Formation after Yang Hongmei, 2006)

河北怀来-涑水一带下马岭组黑色岩系中硅质岩数据(杨红梅, 2006),  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 、 $\text{Zn} - \text{Ni} - \text{Co}$  及  $(\text{Co} + \text{Ni} + \text{Cu}) - \text{Co}/\text{Zn}$  图解显示, 该套黑色岩系的形成应该与海底热水沉积或热液蚀变地壳有关(图 5a, 5b, 5c)。在  $\text{Ce}/\text{La} - \text{La}/\text{Yb}$  与  $\Sigma\text{REE} - \text{La}/\text{Yb}$  图解中样品落入沉积岩区和玄武岩区(图 5d, 5e), 暗示该黑色岩系兼具有正常海相沉积与海底热液作用的特点。

Alexander 等(2008)在研究南非 Pongola Supergroup 中的条带状铁建造时, 提出  $\text{Eu}/\text{Sm} - \text{Sm}/\text{Yb}$  二元混合模型来区分海水与海底热液的贡献量。该图解显示下马岭组黑色岩系接近于海水与水成铁锰质地壳(图 5f), 表明黑色岩系原始溶液中海底热液所占比例尚不足 0.1%。海底高温热液具有强烈的 Eu 正异常, 且 Eu 正异常的高低通常用于判别高温热液的贡献量(Bau and Dulski, 1999)。在 PAAS 标准化稀土元素配分图上, 该黑色岩系显示很弱的 Eu 正异常或不显示 Eu 异常(图 3b), 同样暗示原始溶液中海底热液组分较少, 含量不足 0.1%。

## 4.2 沉积环境

张士三(1988)将  $100 \text{ MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  值作为判定沉积水体盐度的指标, 认为该值小于 1 为淡水沉积环境; 1~10 为海陆过渡环境; 10~100 为海水环境。本文黑色岩系该值为 3.0~44.0, 表明其沉积环境为海陆过渡环境或海水环境。雷卞军等(2002)指出  $\text{CaO}/(\text{Fe} + \text{CaO})$  值也是反映海水盐度的重要指标, 认为该值小于 0.2 为低盐度, 0.2~0.5 为中等盐度, 大于 0.5 为高盐度。本文研究的黑色岩系该值为 0.01~0.44, 平均为 0.19, 表明海水盐度为中低盐度, 说明其沉积环境可能为受淡水影响的深水环境。

某些微量元素含量或比值对氧化还原条件的变化很敏感(如 Ni、Mo、Ba、V 等), 可根据这些指标分析古氧化还原条件。本文所测样品 Ni (平均  $34.10 \times 10^{-6}$ )、Mo (平均  $5.01 \times 10^{-6}$ )、Cu (平均  $29.25 \times 10^{-6}$ )、Zn (平均  $213.13 \times 10^{-6}$ )、Ba (平均  $536.45 \times 10^{-6}$ )、V (平均  $129.12 \times 10^{-6}$ ) 等氧化还原敏感元素均具有较高的含量, 要使此类元素大量富集必须要求沉积水体存在超过门限浓度的  $\text{S}^{2-}$ , 即必须存在缺氧条件(Tribovillard, 2006)。Hatch 等(1992)通过对北美堪萨斯州上宾西法尼亚系黑色页岩研究, 认为  $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$  值能有效反映环境氧化还原条件:  $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$  值为 0.84~0.89 时, 反映水体分层, 底层水体中出现  $\text{H}_2\text{S}$  的厌氧环境;  $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$  值为 0.54~0.82 时, 为水体分层不强烈的厌氧环境;  $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$

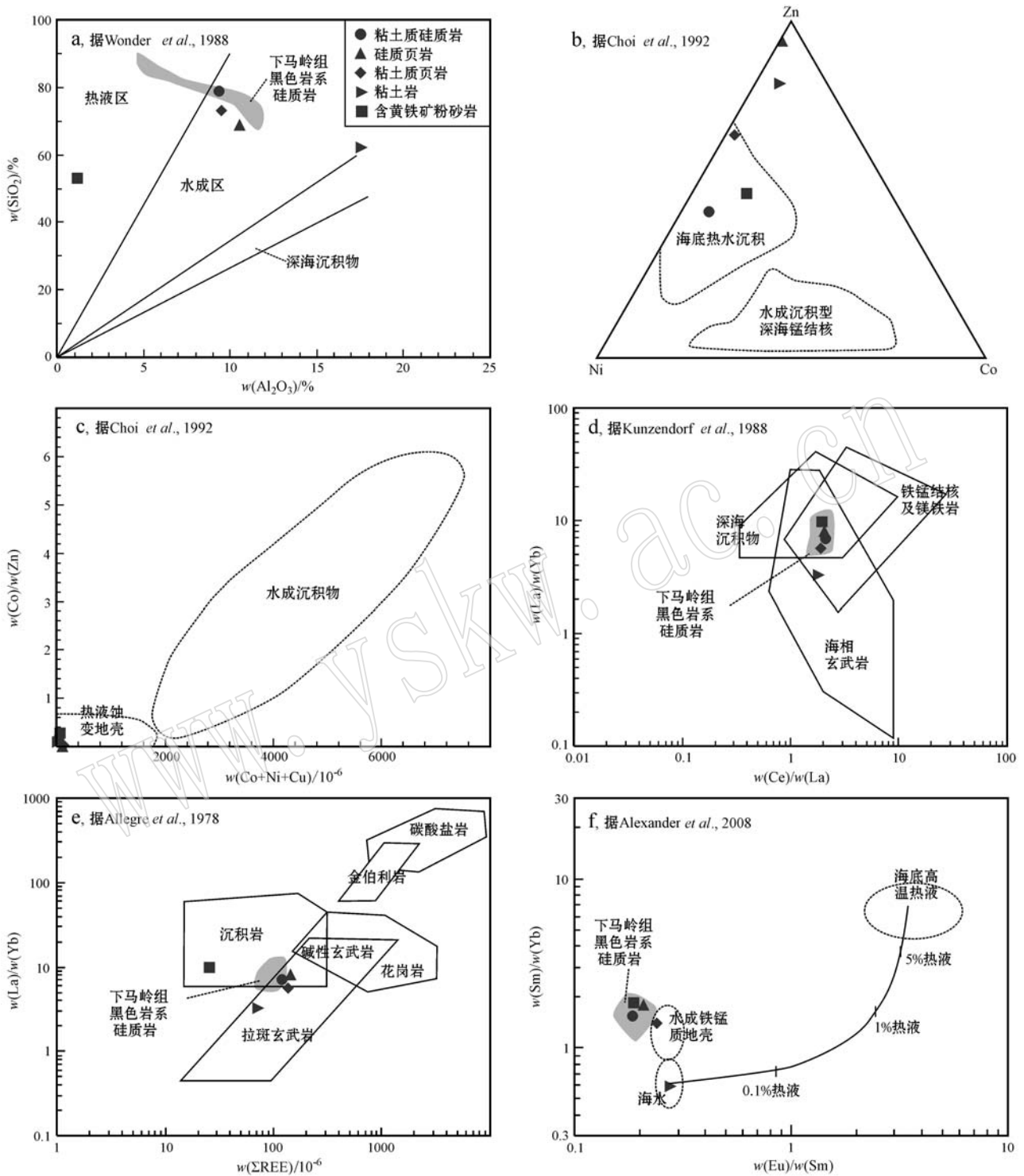


图 5 燕山东段下马岭组黑色岩系主微量元素判别图解

Fig. 5 Major and trace element discrimination diagrams for black rock series in Xiamaling Formation, eastern Yanshan area

值为 0.46 ~ 0.60 时, 为水体分层弱的贫氧环境。Jones 等(1994)认为  $\text{Ni}/\text{Co}$  值可以判别氧化还原条件, 其中  $\text{Ni}/\text{Co} > 7.00$  为极贫氧-厌氧环境;  $\text{Ni}/\text{Co} =$

5.00 ~ 7.00 时为贫氧环境;  $\text{Ni}/\text{Co} < 5.00$  为氧化环境。 $\text{Ce}$  元素对氧化还原条件变化特别敏感。Wright 等(1987)曾定义  $\text{Ce}_{\text{anom}} = \lg [3 \text{ Ce}_N / (2 \text{ La}_N +$



$Nd_N$ )], 认为  $Ce_{anom} < -0.10$  表示氧化环境,  $Ce_{anom} > -0.10$  表示缺氧环境。研究区下马岭组黑色岩系样品  $V/(V+Ni)$  值为  $0.39 \sim 0.97$ , 平均为  $0.74$ ,  $Ni/Co$  值为  $1.88 \sim 12.32$ , 平均为  $6.70$ ,  $Ce_{anom}$  为  $-0.09 \sim -0.03$  (表 1), 均显示缺氧环境。综上, 本文认为下马岭组黑色岩系沉积于受淡水影响的深水缺氧环境。

### 4.3 构造背景

近年来, 国内学者对下马岭组形成时代、构造背景等方面进行了深入研究, 并获得了一些新认识。高林志等 (2007) 获得下马岭组凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为  $1368 \text{ Ma}$ , 指出下马岭组形成于中元古代晚期, 从而引发对下马岭期所处的大地构造背景进行重新思考。另有部分学者研究了下马岭组钾质斑脱岩地球化学特征, 认为其形成于与板块俯冲相关的岛弧背景, 可能是伸展构造过程开始时的沉积记录, 并推测可能为 Rodinia 超大陆汇聚时的沉积-地层学响应 (苏文博等, 2006; 杨红梅, 2006)。乔秀夫等 (2007) 提出下马岭组的沉积环境可能是弧后盆地。此外, 在下马岭组中发育大量辉绿岩床, 其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄  $1320 \pm 6 \text{ Ma}$ , 陆松年等 (2010) 认为可能是华北克拉通北部一次裂解事件的产物, 并倾向华北下马岭组及辉绿岩侵入的构造背景是处于伸展构造背景。由此看来, 国内学者对下马岭组沉积时的构造环境, 或者是中元古代华北克拉通所处的构造背景尚存在不同认识。

Sugisaki 等 (1982) 通过对沉积岩中  $MnO/TiO_2$  比值的研究, 认为大陆坡和边缘海环境中形成的沉积岩该比值一般小于  $0.5$ ; 形成于开阔大洋环境的沉积岩该比值达  $0.5 \sim 3.5$ 。本区黑色岩系  $MnO/TiO_2$

为  $0.01 \sim 0.09$ , 表明其沉积于边缘海环境。Murray 等 (1990, 1994) 统计对比了不同构造环境中硅质岩的  $Ce/Ce^*$  值, 发现从大洋中脊到大陆边缘硅质岩的  $Ce$  负异常逐渐减弱: 洋中脊为强负  $Ce$  异常,  $Ce/Ce^*$  值平均为  $0.29$ ; 大洋盆地具明显  $Ce$  负异常,  $Ce/Ce^*$  值平均为  $0.5$ ; 大陆边缘由弱  $Ce$  负异常过渡到  $Ce$  正异常。本文所测下马岭组黑色岩系  $Ce/Ce_{PAAS}^* = 0.82 \sim 0.93$  (表 1), 表明其形成于大陆边缘。Bhatia 等 (1986) 提出了一系列主微量图解用以判别沉积岩形成时的构造背景。基于本文所测数据,  $La/Sc - Ti/Zr$ ,  $La - Th - Sc$  及  $Th - Sc - Zr/10$  图解显示下马岭组黑色岩系很可能形成于大陆岛弧环境 (图 6a, 6b, 6c), 暗示中元古代时曾有一板块向华北板块俯冲 (杨红梅, 2006)。同时, 板块俯冲过程会引起剧烈的海底热液活动, 为黑色岩系沉积过程中受到热液作用影响提供良好佐证; 大陆岛弧环境, 必定有大量陆源碎屑物质的加入, 亦为黑色岩系沉积环境及陆源组分的贡献提供有力支持。因此, 本文推测下马岭组黑色岩系可能形成于与板块俯冲相关的大陆岛弧背景。

## 5 结论

本文基于野外地质调查及室内镜下观察, 对燕山东段下马岭组内发育的一套黑色岩系进行了岩石地球化学分析。研究认为: ① 该套黑色岩系物质来源主要为大陆碎屑组分, 沉积自海水与海底热液 ( $<0.1\%$ ) 的混合溶液; ② 该岩系产于受淡水影响的深水缺氧环境, 可能形成于与板块俯冲相关的大陆岛弧背景。

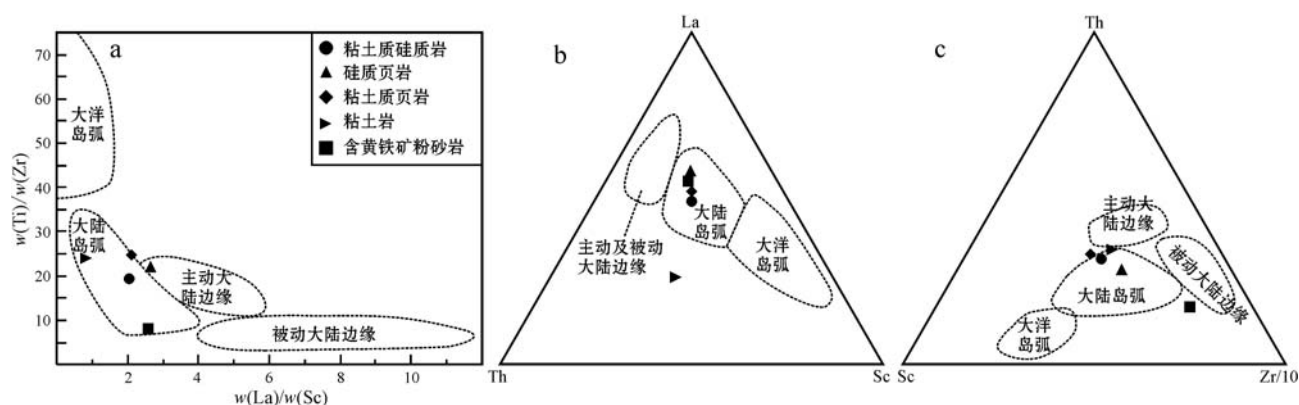


图 6 黑色岩系构造背景判别图解 (据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 6 Tectonic discrimination diagram for black rock series (after Bhatia and Crook, 1986)

**致谢** 野外地质工作中得到河北省区域地质矿产调查研究所朱志攀工程师、王硕工程师的帮助,室内分析得到罗善霞高级工程师的指导,评审专家和编辑对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

## References

- Alexander B W, Bau M, Andersson P, *et al.* 2008. Continentially-derived solutes in shallow Archean seawater: rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 378~394.
- Alibo D S and Nozaki Y. 1999. Rare earth elements in seawater: particle association, shale-normalization, and Ce oxidation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 363~372.
- Bao Zhidong, Chen Jianfa, Zhang Shuichang, *et al.* 2004. Developing environment and control factors for source rocks of Middle-Upper Proterozoic in North China[J]. *Sci. China (D)*, 34(S1): 114~119(in Chinese).
- Bau M and Dulski P. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 155: 77~90.
- Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace-element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181~193.
- Chen Jianfa and Sun Xingli. 2004. Preliminary study of geochemical characteristics and formation of organicmatter rich stratigraphy of Xiamaling formation of Later Proterozoic in North China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 15(2): 110~114(in Chinese with English abstract).
- Du Rulin and Li Peiju. 1980. Sinian subgroup in the Western Yanshan [A]. *Sinian Subgroup of China*[C]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 341~357(in Chinese).
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Shi Xiaoying, *et al.* 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuffbed in the Xiamanng Formation of the Qingbaikouan System in North China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(3): 249~255(in Chinese with English abstract).
- Hatch J R and Leventhal J S. 1992. 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, U.S.A. [J]. *Chemical Geology*, 99: 65~82.
- Jones B and Manning A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111: 111~129.
- Kato Y, Kano T and Kunugiza K. 2002. Negative Ce anomaly in the Indian Banded iron Formations: evidence for the Emergence of Oxygenated Deep-Sea at 2.9~2.7 Ga[J]. *Resource Geology*, 52(2): 101~110.
- Kessels K, Mutterlose J and Ruffell A. 2003. Calcareous nannofossils from late Jurassic sediments of the Volga Basin (Russian Platform): evidence for productivity controlled black shale deposition[J]. *International Journal of Earth Science*, 92: 743~757.
- Lei Bianjun, Que Hongpei, Hu Ning, *et al.* 2002. Geochemistry and sedimentary environments of the Palaeozoic siliceous rocks in western Hubei[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 22(2): 71~79(in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong and Gao Zhenmin. 1995. REE characteristics of black shale series of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Hunan-Guizhou Province, China, with adiscussion on the REE patterns in marine hydrothermal sediments[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 225~229(in Chinese with English abstract).
- Liu Yan, Zhong Ningning, Song Tao, *et al.* 2011. Kinetics of marine oil shale: a case study of Xiamaling formation oil shale in Yanshan Region, North China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 41(1): 78~84(in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huaikun and Xiang Zhenqun. 2010. Advances in the study of Mesoproterozoic geochronology in China: a review[J]. *Geology in China*, 37(4): 1 002~1 013(in Chinese with English abstract).
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes[A]. Lipin B R and McKay G A. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements* [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21: 169~200.
- McLennan S M and Taylor S R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends[J]. *Journal of Geology*, 1: 1~21.
- Murray R W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications[J]. *Sedimentary Geology*, 90: 213~232.
- Murray R W, Buchholtz T, Jones D L, *et al.* 1990. Rare earth element as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. *Geology*, 18: 268~271.
- Mutterlose J, Pauly S and Steuber T. 2009. Temperature controlled deposition of early Cretaceous (Barremianearly Aptian) black shales in

- an epicontinental sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 273: 330~345.
- Nameroff T J, Balistreri L S and Murray J W. 2002. Suboxic trace metal geochemistry in the eastern tropical North Pacific [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 1 139~1 158.
- Peter J M and Scott S D. 1988. Mineralogy, composition, and fluid-inclusion microthermometry of seafloor hydrothermal deposits in the southern trough of Guatmas basin, gulf of California[J]. *Canadian Mineralogist*, 26: 567~587.
- Qiao Xiufu. 1976. Investigtion on stratigraphy of the Qingbaikou group of the Yanshan mountains, North China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 246~265(in Chinese).
- Qiao Xiufu, Gao Linzhi and Zhang Chuanheng. 2007. New idea of the Meso- and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Sino-Korean Plate[J]. *Geological Bulletin of China*, 26 (5): 503~509(in Chinese with English abstract).
- Smith P A and Cronan D S. 1983. The geochemistry of metaliferous sediments and waters associated with shallow submarine hydrothermal activity (Santorini, Aegean Sea) [J]. *Chemical Geology*, 39: 241~262.
- Su Wenbo, Li Zhiming, Shi Xiaoying, *et al.* 2006. K-bentonites and black shales from the Wufeng-Longmaxi formations (Early Paleozoic, South China) and Xiamaling formation (Early Neoproterozoic, North China)—implications for tectonic processes during two important transitions[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 82~95(in Chinese with English abstract).
- Sugisaki R, Yamamoto K and Adachi M. 1982. Triassic bedded cherts in central Japan are not pelagic[J]. *Nature*, 298: 644~647.
- Sun Xingli, Chen Jianfa, Liu Wenhui, *et al.* 2003. Hydrothermal venting on the seafloor and formation of organic-rich sediments—evidence from the Neoproterozoic Xiamaling formation, North China[J]. *Geological Review*, 49(6): 588~595(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1~328.
- Toth J R. 1980. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 91: 44~54.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, *et al.* 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update[J]. *Chemical Geology*, 232: 12~32.
- Tyson R V. 1987. The genesis and Palynofacies characteristics of marine petroleum source rock[A]. Brooks J R V and Fleet A J. *Marine Petroleum Source Rock*[C]. Geological Society Special Publication, Blackwell Scientific Publications, 26: 47~68.
- Wang Hongzhen. 1999. On the international stratigraphical chart and stratigraphic regionalization of China[J]. *Geoscience*, 13(2): 190~193(in Chinese with English abstract).
- Wang Jie. 2002. The Geochemical and Potential of Hydrocarbon-producing of Likely Source Rocks in the North of North China[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Science, 1~65(in Chinese with English abstract).
- Wang Liyun, Luo Shunshu, Zhang Min, *et al.* 2009. Characteristics of sedimentary facies of Xiamaling formation at Beizhangzi area, Kuancheng, Hebei[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 23 (3): 30~32(in Chinese with English abstract).
- Wang Tieguan, Huang Guanghui and Xu Zhongyi. 1988. A fossil oil pool on the basement of the Xiamaling formation of the Upper Proterozoic in Longtangou[J]. *Oil and Gas Geology*, 9(3): 278~287 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zuodong, Liang Mingliang, Zheng Jianjing, *et al.* 2013. Molecular fingerprint of source rock of Xiamaling formation of Meso-Neoproterozoic in North China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 24(3): 599~603(in Chinese with English abstract).
- Wright J, Schrader H and Holser W T. 1987. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 51: 637~644.
- Wu Chaodong, Yang Chengyun and Chen Qiyang. 1999. The Origin and Geochemical Characteristics of Upper Sinian Lower Cambrian Black Shales in Western Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18 (1): 26~39(in Chinese with English abstract).
- Xing Yusheng, Gao Zhenjia, Wang Ziqiang, *et al.* 1989. The Upper Precambrian of China. *Stratigraphy of China*. No. 3[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~314(in Chinese).
- Xu Xiaochun, Wang Wenjun, Xiong Yaping, *et al.* 2009. REE geochemical characteristics of the Lower Cambrian black shale series in Shitai area, Anhui Province, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(2): 118~128(in Chinese with English abstract).
- Yang B Y, Hu B, Bao Z Y, *et al.* 2011. REE geochemical characteristics and depositional environment of the black shale-hosted Baiguoyuan Ag-V deposit in Xingshan, Hubei Province, China[J]. *Journal of Rare Earths*, 29(5): 418~436.
- Yang Hongmei. 2006. Implication of the Depositional Environment and the Tectonic Setting of the K-Bentonite-bearing Black Shales in the Xiamaling Formation, Early Neoproterozoic, North China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1~53 (in Chinese).

with English abstract).

- Yang Jian, Yi Facheng, Liu Tao, *et al.* 2005. REE geochemical characteristics of the Lower Cambrian black shale series in northern Guizhou and their original significance[J]. Chinese Journal of Geology, 40(1): 84~94(in Chinese with English abstract).
- Yu B S, Dong H L, Widomb E, *et al.* 2009. Geochemistry of basal Cambrian black shales and cherts from the Northern Tarim Basin, Northwest China: implications for depositional setting and tectonic history[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 34: 418~436.
- Zhang Shisan. 1988. Research and Application of sedimentary layer of magnesium and aluminum content[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, (2): 12~13(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Bian Lizeng, *et al.* 2007. The Xiaomaling oil shale generated through rhodophyta over 800 Ma ago[J]. Science in China: Series D, 50(4): 527~535(in Chinese).
- Zhu Zhengjie, Zhu Changsheng, Cheng Lijun, *et al.* 2011. Elemental characteristics of the Lower Cambrian black rock series in Chengkou district, Chongqing and their genetic significance[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 31(2): 66~72(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 鲍志东, 陈践发, 张永昌, 等. 2004. 北华北中上元古界烃源岩发育环境及控制因素[J]. 中国科学 D 辑, 34(增刊 I): 114~119.
- 陈践发, 孙省利. 2004. 华北新元古界下马岭组富有机质层段的地球化学特征及成因初探[J]. 天然气地球科学, 15(2): 110~114.
- 杜汝霖, 李培菊. 1980. 燕山西段震旦亚界[A]. 中国震旦亚界[C]. 天津: 天津科学技术出版社, 341~357.
- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 等. 2007. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质通报, 26(3): 249~255.
- 雷卞军, 阙洪培, 胡宁, 等. 2002. 鄂西古生代硅质岩的地球化学特征及沉积环境[J]. 沉积与特提斯地质, 22(2): 71~79.
- 李胜荣, 高振敏. 1995. 湘黔地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征-兼论海相热水沉积岩稀土模式[J]. 矿物学报, 15(2): 225~229.
- 刘岩, 钟宁宁, 宋涛, 等. 2011. 海相油页岩的生烃动力学特征——以燕山地区下马岭组油页岩为例[J]. 吉林大学学报, 41(增刊 1): 78~84.
- 陆松年, 李怀坤, 相振群. 2010. 中国中元古代同位素地质年代学研究进展述评[J]. 中国地质, 37(4): 1002~1013.
- 乔秀夫. 1976. 青白口群地层学研究[J]. 地质科学, (4): 246~265.
- 乔秀夫, 高林志, 张传恒. 2007. 中朝板块中-新元古界年代地层柱与构造环境新思考[J]. 地质通报, 26(5): 503~509.
- 苏文博, 李志明, 史晓颖, 等. 2006. 华南五峰组-龙马溪组与华北下马岭组的钾质斑脱岩及黑色岩系: 两个地史转折期板块构造运动的沉积响应[J]. 地学前缘, 13(6): 82~95.
- 孙省利, 陈践发, 刘文汇, 等. 2003. 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[J]. 地质论评, 49(6): 588~595.
- 王鸿祯. 1999. 关于国际(年代)地层表与中国地层区划[J]. 现代地质, 13(2): 190~193.
- 王杰. 2002. 华北北部中上元古界可能烃源岩地球化学特征及生烃潜力[D]. 兰州: 中国科学院兰州地质研究所, 1~65.
- 王丽云, 罗顺社, 张敏, 等. 2009. 河北宽城北杖子地区下马岭组沉积相特征[J]. 石油地质与工程, 23(3): 30~32.
- 王铁冠, 黄光辉, 徐中一. 1988. 辽西龙潭沟元古界下马岭组底砂岩古油藏探讨[J]. 石油与天然气地质, 9(3): 278~287.
- 王作栋, 梁明亮, 郑建京, 等. 2013. 华北中-上元古界下马岭组烃源岩分子指纹特征[J]. 天然气地球科学, 24(3): 599~603.
- 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 1999. 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, 18(1): 26~39.
- 邢裕盛, 高振家, 王自强, 等. 1996. 新元古界, 中国地层典[M]. 北京: 地质出版社, 1~117.
- 徐晓春, 王文俊, 熊亚平, 等. 2009. 安徽石台早寒武世黑色岩系稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(2): 118~128.
- 杨红梅. 2006. 华北北部新元古代下马岭组黑色岩系沉积环境及构造古地理意义[D]. 北京: 中国地质大学, 1~53.
- 杨剑, 易发成, 刘涛, 等. 2005. 黔北黑色岩系稀土元素地球化学特征及成因意义[J]. 地质科学, 40(1): 84~94.
- 张士三. 1988. 沉积岩层中镁铝含量比的研究及其应用[J]. 矿物岩石地球化学通报, (2): 12~13.
- 张永昌, 张宝民, 边立曾, 等. 2007. 8 亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩[J]. 中国科学 D 辑, 37(5): 636~643.
- 朱正杰, 朱长生, 程礼军. 2011. 重庆城口地区下寒武统黑色岩系元素地球化学特征及其成因[J]. 矿物岩石, 31(2): 66~72.