

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0070-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.014

邯郸石盒子组黏土岩矿物学与地球化学特征

辛雨萌^{1,2}, 张景森^{1,2}, 赵云云^{1,2}, 许健^{1,2}, 金超^{1,2}, 邢乐才^{1,2}

(1. 河北工程大学河北省资源勘测研究重点实验室, 河北邯郸 056038; 2. 河北工程大学地球科学与工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 对邯郸三陵地区二叠系石盒子组黏土岩进行薄片光学显微镜和电子探针分析, 利用X射线荧光法测试其主量元素, 利用电感耦合等离子体质谱法分析其微量元素。结果表明: (1) 黏土岩主要矿物是伊利石、石英、叶蜡石、鲕绿泥石和钠长石, 类似青磐岩矿物组合, 副矿物有黄铜矿和微量的闪锌矿、独居石及锆石; (2) 黏土岩稀土元素异常富集, 以轻和部分中稀土元素富集最为强烈, 可能是热液流体改造的结果; (3) 黏土岩具有潜在的资源化利用价值。

关键词: 热液蚀变矿物; 显微热液通道; 稀土元素异常富集; 资源化利用

中图分类号: P581

文献标志码: A

Characteristics of mineralogy and geochemistry of claystone from Shihezi Formation in Handan area

XIN Yumeng^{1,2}, ZHANG Jingsen^{1,2}, ZHAO Yunyun^{1,2}, XU Jian^{1,2}, JIN Chao^{1,2}, XING Lecai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Resource Survey and Research of Hebei Province, Hebei Handan 056038, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: The claystone from Permian Shihezi Formation in Sanling area, Handan, was analyzed for minerals by using optical microscope and electronic microprobe analyzer (EMPA), for major elements by using X-ray fluorescence spectrum (XRF) analyzer, and for trace elements by using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) analyzer. The result shows that, (1) the claystone is composed of illite, quartz, pyrophyllite, chamosite and albite, with a trace amount of chalcopyrite, monazite and zircon, and such a mineral assemblage is similar to propylite; (2) the claystone is abnormally enriched in rare earth elements (REE), especially in light ones and some middle ones, which is probably the result from a hydrothermal action; and (3) it is valuable as a potential resource.

Key words: hydrothermally altered mineral; micro channel of hydrothermal fluid; abnormal enrichment of rare earth element; a potential resource

近年来,煤系地层中共、伴生稀有金属元素如锂、镓、锆等矿床的研究取得了许多重要进展^[1],对煤系黏土岩的研究也受到学者们的广泛重视^[2]。许多学者对黏土岩的研究侧重于探讨其来源、成因和沉积环境^[2],或者关注伊利石、高岭石等少数特殊矿床^[3],但对黏土岩矿物学研究不够充分、在解释其地球化学特征方面缺少矿物学依据。本文详细分析了邯邢矿区三陵地区二叠系石盒子组典型黏土岩样

品的矿物、主量和微量元素,对矿区黏土岩中微量元素异常的成因提出了新的解释,讨论了其稀土元素富集潜在的资源化利用意义。

1 地质背景

邯邢矿区位于华北克拉通陆内造山带太行山南段中部、太行山与华北平原接壤地带。区内出露地

收稿日期: 2018-05-03

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330317); 河北省高等学校科学技术研究拔尖人才项目(BJ2018010); 河北省自然科学基金项目(D2013402026)

作者简介: 辛雨萌(1994-),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为地质资源与地质工程。

层自西向东有太古宇赞皇群变质岩系、元古宇长城系砂岩、古生界寒武系-奥陶系碳酸盐岩和石炭系-二叠系含煤岩系、中生界三叠系碎屑岩和白垩系火山岩、和新生界。地层总体走向北东，向南东方向缓倾斜，构成单斜式构造。在单斜上发育有北东和北北东向展布的褶皱、断层和岩浆岩带^[4]。岩浆岩形成于早白垩世^[5]，主要由闪长岩、二长岩和正长岩组成，伴有少量辉长岩^[6]，侵位于寒武系-三叠系中，呈若干个岩体被剥露出地表。

三陵地区地处矿区东侧边缘，其东侧有邯鄯断层通过，西侧发育紫山断层，北邻洪山碱性杂岩体^[7]。区内西部出露少量二叠系石盒子组，中东部大部为第四系所覆盖。

2 样品与测试分析

样品采自邯郸市西北侧三陵乡 K10 钻孔孔深 311 m 处的岩芯，是石盒子组有代表性的、厚达 6 m 的浅灰色黏土岩，其外观均匀，层理不明显、呈致密块状。

对样品岩石薄片使用光学显微镜和电子探针显微分析仪 (EPMA) 进行了详细的矿物学研究。对样品粉末，使用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 分析了主量元素含量，使用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 进行了微量元素分析。分析测试操作严格按照相关规范执行。

3 结果与讨论

3.1 矿物学特征

黏土岩主要矿物是伊利石、石英、叶蜡石、鲕绿泥石和钠长石，另有少量黄铜矿和微量闪锌矿、独居石和锆石。根据黏土岩岩石和主要矿物的主量元素分析结果，利用 MathWorks 公司的数学软件 MATLAB 线性规划方法拟合计算，获得主要矿物的质量含量 (表 1)，这些矿物密度相近，其质量含量与体积含量非常接近，所以岩石属于复成分伊利石黏土岩。

典型矿物的化学成分与分子标准化结果列于表 2。对矿物成分进行分子标准化计算时，以分子式中氧原子数为基准，Fe 元素按 +2 价离子处理。

伊利石是层间离子不足的云母类矿物，干涉色级别高，呈鳞片状、长条状，前者直径 10 ~ 25 μm，后者长达 50 μm、宽 7 μm。在电子探针仪背散射电子像 (BSEI) 中呈现与鲕绿泥石相近的灰度 (图 1(a)、(b)、(g))。其化学成分有两种：一种低硅高铝、Al/Si = 0.86、接近于白云母 1.00，含少量 F 元素；另一种高硅低铝、Al/Si = 0.49、接近于叶蜡石 0.50，不含 F 元素 (表 2)。伊利石层间离子 K⁺ 为 0.51 ~ 0.54，Na⁺ 为 0.16 ~ 0.28 (表 2)。

石英呈粒状，有大、小两种尺寸，大者粒径达 40 μm，颗粒边缘不规则；小者粒径约 6 μm。颗粒间存在孔隙，宏观上呈多孔状 (图 1(a)、(b)、(g))。

叶蜡石在薄片无色，解理发育，聚合成花瓣状集合体，花瓣大小约 30 μm × 60 μm (图 1(e)、(f)、(h))，在 BSEI 上灰度很暗、与石英十分接近 (图 1(e))。其化学成分 Al/Si 为 0.48，含少量 F 元素 (表 2)。叶蜡石是典型的低级变质矿物，在热液蚀变岩中十分常见。

鲕绿泥石呈大片状集合体，光学显微镜下反射、透射能力都较强，干涉色低，BSEI 中略显絮状 (图 1(a)–(h))。其化学成分有高硅低铝、Al/Si = 1.23 和低硅高铝、Al/Si = 1.90 两种 (表 2)。鲕绿泥石可以形成于沉积和成岩过程，也可以由变质作用和热液蚀变形成。按热液成因，可利用化学成分估计其形成温度大致为 270 °C ~ 440 °C^[8]。

钠长石在 BSEI 中呈现与石英十分近似的暗灰度而难以被观察到。根据岩石和矿物成分线性规划拟合，可以确定黏土岩中含有少量的钠长石。

黄铜矿呈粒状，粒径 50 ~ 60 μm，光学显微镜透射光下呈褐色，反射光下呈亮铜黄色，BSEI 中明亮，与石英 (图 1(d))、或与石英 + 叶蜡石 + 绿泥石 (图 1(e)、(f)、(h)) 共生。闪锌矿，见于较粗粒石英中，反射光下呈白色。独居石呈细小粒状，大小约 8 μm × 5 μm；锆石呈细小长棒状，大小约 3 μm × 11 μm；二者均分布于细小石英颗粒或其与绿泥石颗

表 1 基于线性规划的黏土岩主要矿物的质量含量 (%)

Tab.1 Mass contents of rock forming minerals in the claystone by linear programming (%)

矿物	伊利石	石英	叶蜡石	鲕绿泥石	钠长石
含量	32.4	21.7	21.3	19.3	5.3

表2 典型矿物电子探针分析化学成分(%)与分子标准化结果
Tab.2 EPMA data of typical minerals (%) and normalized molecular formulas

矿物	伊利石	伊利石	叶腊石	绿泥石	绿泥石
SiO ₂	47.81	59.41	65.29	21.87	18.49
TiO ₂	0.24	0.19	0.00	0.15	0.10
Al ₂ O ₃	34.77	24.85	26.55	22.75	28.53
Cr ₂ O ₃	0.00	0.14	0.00	0.16	0.06
FeO _T	0.77	0.92	0.19	35.41	34.15
MnO	0.00	0.00	0.00	0.44	0.56
MgO	0.00	0.08	0.02	5.83	4.24
CaO	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
Na ₂ O	2.17	1.28	0.12	0.12	0.07
K ₂ O	6.36	6.16	0.00	0.00	0.02
P ₂ O ₅	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
F	0.06	0.00	0.08	0.02	0.01
合计	92.18	93.06	92.26	86.79	86.23
标准氧原子数	11	11	11	14	14
Si	3.20	3.86	4.00	2.48	2.01
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
Al	2.74	1.90	1.92	3.04	3.82
Cr	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Fe ²⁺	0.04	0.05	0.01	3.36	3.25
Mn	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05
Mg	0.00	0.01	0.00	0.99	0.72
Ca	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Na	0.28	0.16	0.01	0.03	0.01
K	0.54	0.51	0.00	0.00	0.00
离子总数	6.81	6.51	5.95	9.98	9.88
F	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
Al/Si	0.86	0.49	0.48	1.23	1.90

粒之间(图1(a)、(b))。

岩石薄片常见显微斑块构造, 斑块大小约1.5 mm × 0.9 mm, 其中不同的矿物组合呈同心环带状分布, 即中心是黄铜矿+叶腊石+石英+鲕绿泥石, 向外为鲕绿泥石为主的环带, 最外侧为石英+鲕绿泥石+伊利石(图1(h)、(i))。这种环带构造具有显微热液通道蚀变特征, 矿物组合与青磐岩化带蚀变矿物组合相似, 表明黏土岩遭受到了热液活动的改造。

3.2 主量元素

样品主量元素氧化物(表3)相对于大陆上地壳平均成分^[10], 表现为TiO₂、Al₂O₃、FeO相对富集, SiO₂和MnO较为相近, 而K₂O稍微亏损, MgO、CaO、Na₂O、P₂O₅明显亏损, 特别是CaO显著亏损。

其与邯邢矿区石盒子组伊利石黏土岩^[2]相比, MnO和MgO含量明显较高、与出现鲕绿泥石有关, 而其他元素氧化物含量较为相近。

3.3 稀土和微量元素

3.3.1 稀土元素

样品稀土元素总含量TREY(包括元素Y)高达937.96 mg/kg(表4), 是大陆上地壳(169.14 mg/kg)的5.55倍, 显示出稀土元素异常富集特征。其轻、重稀土元素含量质量比值LREE/HREE为13.63、比值La_N/Yb_N为22.96(表4), 对球粒陨石稀土元素标准化^[11]配分模式曲线右倾(图2(a)), 都反映了轻、重稀土元素之间具有显著分异。比值La_N/Sm_N和Gd_N/Yb_N分别为3.76和3.55(表4), 则反映出轻、

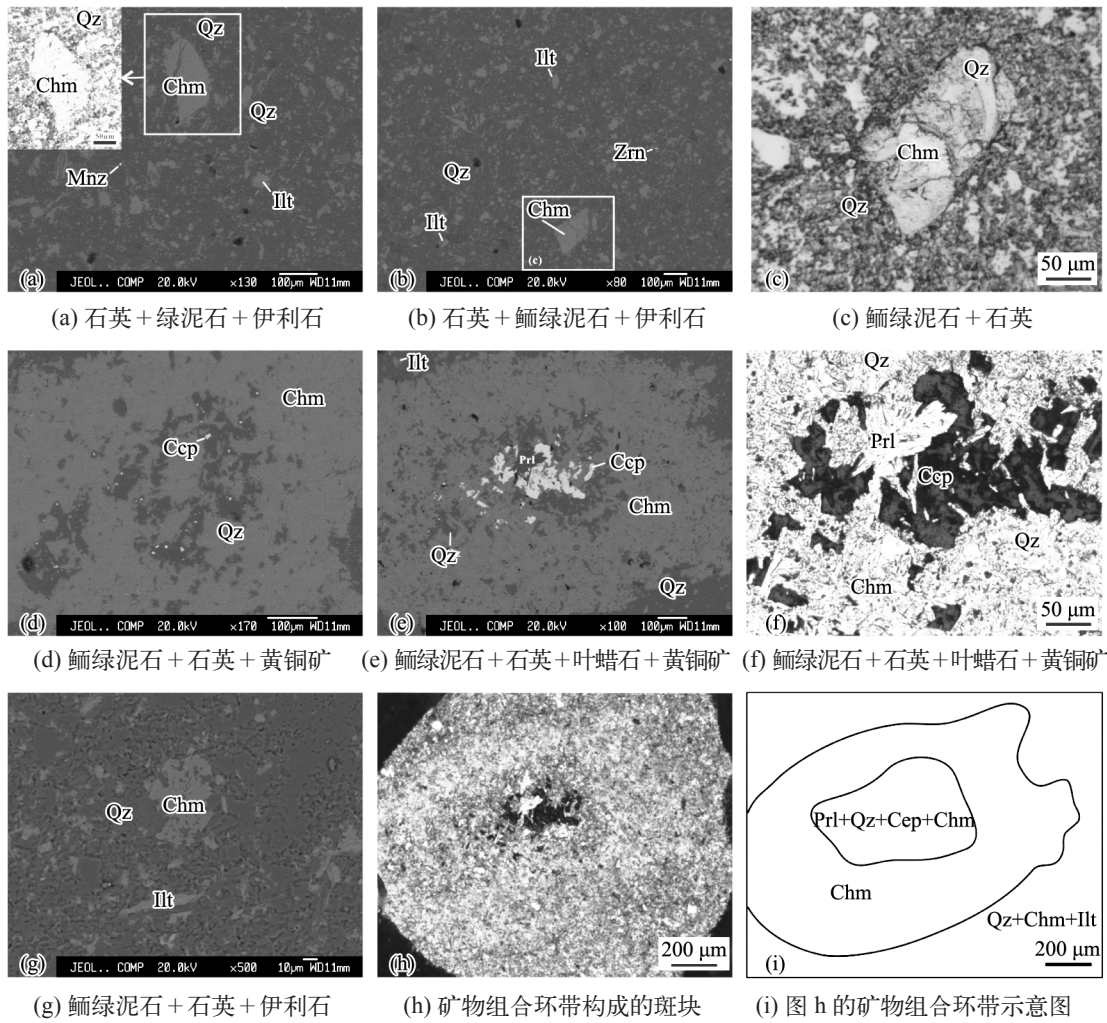


图 1 黏土岩中矿物显微图象 (矿物编号见文献 [9])

Fig.1 Microphotographs of minerals in the clay stone(mineral abbreviations see reference[9])

表 3 黏土岩主量元素氧化物分析结果 (w%)

Tab.3 The major elements in oxides of the bulk claystone (w%)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
63.03	0.71	19.44	0.85	6.95	0.09	1.10	0.26	1.09	2.01	0.07	3.59

表 4 黏土岩稀土元素含量分析结果 (mg/kg) 及有关地球化学参数

Tab. 4 The contents of rare earth elements (mg/kg) and geochemical parameters of the claystone

La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
194	382	44.5	163.0	32.2	6.26	25.2	3.43	15.5	2.45	6.21	0.98
Yb	Lu	Y	TREY	LREE	HREE	L/H	Ce/Ce*	Eu/Eu*	La _N /Yb _N	La _N /Sm _N	Gd _N /Yb _N
5.74	0.79	55.7	937.96	821.96	60.30	13.63	0.99	0.67	22.96	3.76	3.55

注: LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu; HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu; TREY = LREE + HREE + Y; L/H = LREE/HREE; Ce/Ce* = Ce_N/(La_N × Pr_N)^{1/2}; Eu/Eu* = Eu_N/(Sm_N × Gd_N)^{1/2}; 稀土元素标准化 (下标 N) 依据球粒陨石数据^[11]。

重稀土分组内部元素之间也有一定程度的分异。样品稀土元素配分模式与大陆上地壳配分模式相似 (图 2(a)), 表明其陆壳来源特征^[2]。样品基本不显示 Ce

异常, 具有 Eu 中等负异常 (表 4)。而邯邢矿区伊利石黏土岩总稀土元素含量均低于本文样品, 且高低差别较大, 表现为高、接近和 (多数) 低于大陆上

地壳三种情形,轻、重稀土元素分异明显,配分模式曲线呈上凸、下凹等多种样式,多数显示Ce弱负异常,Eu则表现出弱负异常、无异常和弱正异常三种情形^[2](图2(a)–(c))。

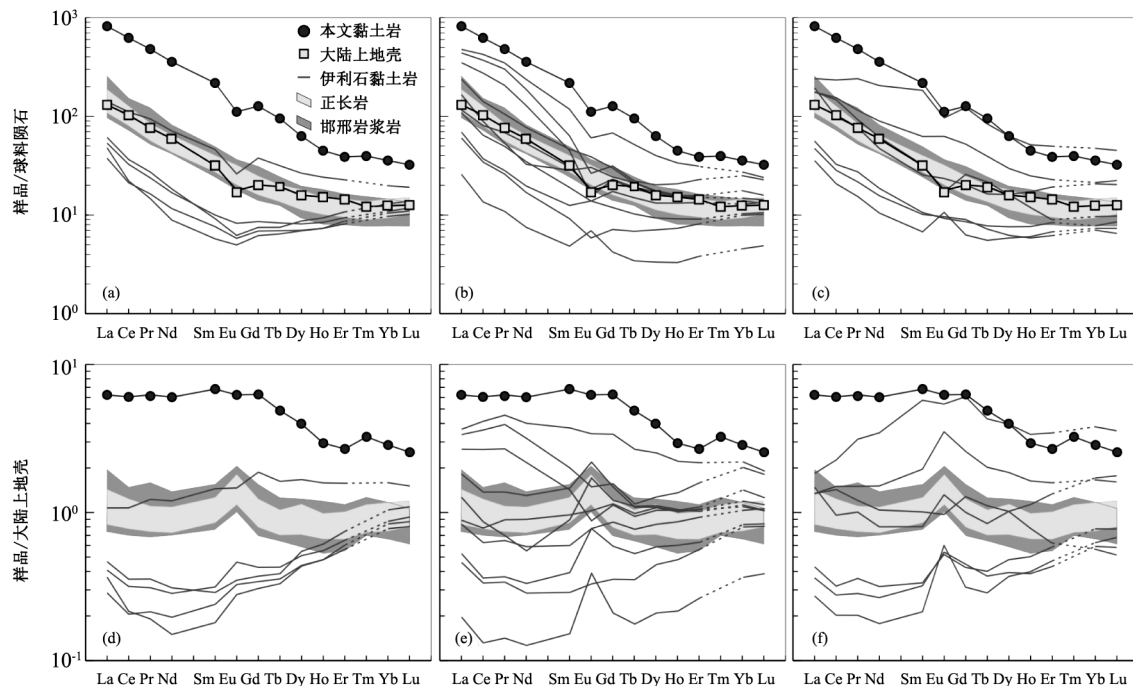
样品稀土元素相对于大陆上地壳平均值^[10]表现为轻、重稀土元素都相对富集,且以轻(和部分中)稀土元素富集更显著(图2(d))。在这种标准化图解上,邯邢矿区伊利石黏土岩稀土元素差异特征表现得尤为突出:相对于大陆上地壳同时存在轻、中、重稀土富集和亏损两种现象,特别是轻稀土元素富集和亏损大致呈镜像对称特点(图2(d)–(f)),暗示其成因上可能存在某种内在关联。

黏土岩稀土元素特征受其源岩成分、沉积环境、成岩作用和成岩后流体作用控制^[2]。对于陆源黏土岩,其对大陆上地壳稀土元素标准化曲线一般应较平坦地分布,正常的成岩作用对其影响通常不会太大,沉积环境影响较多的是其Ce和Eu异常特征。有机质作用有可能改变黏土岩稀土元素的一般特征。邯邢矿区伊利石黏土岩有机质含量很少,其稀土元素特征异常很可能是受到成岩后热液流体影响的结果,即部分黏土岩发生稀土元素流失、部分黏土岩

则产生稀土元素富集。本文样品中热液蚀变矿物叶蜡石、热液微通道构造的存在为此提供了可靠的证据。区内章村煤矿太原组和本溪组煤系黏土岩中大量出现叶蜡石,表明黏土岩受热液蚀变具有区域性特点^[13]。

影响邯邢矿区黏土岩的热液最可能由早白垩世岩浆作用引起。对区内洪山火山岩中石英脉流体包裹体研究表明,热液流体呈弱酸性、弱氧化-弱还原性质、温度 $246^{\circ}\text{C} \sim 364^{\circ}\text{C}$,盐度 $7.17 \sim 10.19\text{w}\%\text{NaCl}$ ^[4],其性质与本文样品的蚀变矿物特征较相符合,弱还原性流体还可能导致亏损稀土元素的黏土岩出现中等Eu正异常。这种流体不同于山前地带现今的高盐度、弱碱性、 $\text{SO}_4\text{Cl-CaNa}$ 型岩溶热水^[4]。黏土岩稀土元素与邯邢地区岩浆岩^[5]和正长岩^[12]稀土元素特征不具相似性(图2(a)–(f)),它们不太可能直接来源于岩浆或岩浆岩。

伊利石黏土岩稀土元素(包括Y)赋存状态可能有矿物态(独居石、磷灰石等)或黏土吸附态。黏土岩可分高稀土与低稀土两组,每一组总稀土元素含量与 P_2O_5 和CaO都呈线性到非线性的相关关系^[2],暗示黏土岩中稀土元素具有多种赋存状态。



标准化:(a–c)对球粒陨石^[11];(d–f)对大陆上地壳^[10]。邯邢地区伊利石黏土岩数据来自文献[2],其中(a)和(d)为上石盒子组上部样品,(b)和(e)为上石盒子组下部样品,(c)和(f)为下石盒子组样品;正长岩数据来自文献[12];邯邢地区岩浆岩数据来自文献[5]。

图2 黏土岩稀土元素对球粒陨石和大陆上地壳标准化模式图

Fig.2 The REE patterns of claystone normalized to chondrite and upper continental crust

表5 黏土岩微量元素含量分析结果 (mg/kg) 及有关地球化学参数
Tab.5 The contents of trace elements (mg/kg) and geochemical parameters of the claystone

Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb
21.5	3.0	15.5	78.5	53.1	14.6	21.5	155.0	105.0	28.9	88.5
Sr	Mo	Cd	In	Sb	Cs	Ba	W	Re	Tl	Pb
129	0.98	0.058	0.126	0.379	2.00	418	2.44	<0.002	0.61	15.30
Bi	Th	U	Nb	Ta	Zr	Hf	Nb/Ta	Zr/Hf	Th/U	Co/Ni
0.265	17.00	4.38	15.30	1.12	227.0	6.96	13.66	32.61	3.93	0.68

3.3.2 微量元素

样品微量元素 (表 5) 相对于大陆上地壳, Cu 相对富集程度高, Y、In 相对富集程度较高, V、Cr、Co、Ni、Sr、Cd、Cs、Ba 和 Tl 相对亏损, Be、Zr、Nb、Hf、Ta 和 W 较为接近。样品一些元素对比值, 如 Nb/Ta 和 Th/U 等 (表 5), 十分接近大陆上地壳值 (分别为 13.33 和 3.89)^[10], 表明其具有大陆地壳来源性质。其另一些元素对比值, 如 Zr/Hf 和 Co/Ni (表 5), 分别略低于和高于大陆上地壳比值 (分别为 36.4 和 0.37)^[10], 表明岩石受热液作用影响、元素之间发生了不同程度的分异。

样品中富集的 Cu 和 In 元素主要赋存于黄铜矿中, Y 的赋存与稀土元素相似。

3.4 黏土岩资源化利用

从主量元素来看, 本文黏土岩样品 Al₂O₃ 含量低, 达不到耐火黏土的最低标准 22%。而伊利石黏土岩主量元素含量较为一致, Al₂O₃ 均高于 22%^[2], 可以作为耐火黏土原料利用。

从微量元素来看, 本文样品除稀土元素外的微量元素含量都达不到综合利用标准。邯邢矿区石盒子组部分黏土岩^[2]和本文样品中异常富集稀土元素, 总含量可高于其煤综合利用品位 300 mg/kg^[15], 其中部分岩石稀土元素含量超过离子吸附型稀土矿床最低边界品位甚至工业品位 (氧化物分别为 500 和 800 mg/kg^[16]), 具有潜在的资源化利用价值。由于该地区黏土岩中稀土元素异常富集受热液作用控制, 弄清楚热液活动的范围和源、汇路径, 可评估稀土元素异常规模、确定勘查方向, 非常值得深入研究。

4 结论

1) 邯邢三陵地区二叠系石盒子组黏土岩主要矿物是伊利石、石英、叶蜡石、鲕绿泥石和钠长石,

类似青磐岩矿物组合, 副矿物有黄铜矿和微量闪锌矿、独居石及锆石。

2) 黏土岩稀土元素异常富集, 以轻和部分中稀土元素富集最为强烈, 早白垩世岩浆作用产生的热液流体活动可能是其异常富集的重要原因。

3) 黏土岩具有潜在的资源化利用价值。

参考文献:

- [1] 代世峰, 任 贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (8): 1707-1715.
- [2] 丁述理, 徐博会, 孙玉壮, 等. 邯邢矿区伊利石黏土岩中稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. 煤炭学报, 2009, 34 (5): 583-589.
- [3] 郝俊杰, 莘建宏, 赵新卫, 等. 河北省邯邢地区高岭石伊利石粘土矿床特征及找矿方向 [J]. 化工矿产地质, 2011, 33 (2): 73-80.
- [4] 张景森, 翟艳超, 高明尚, 等. 邯邢洪山金矿化区石英脉流体包裹体特征 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32 (4): 98-103.
- [5] 孙 熠. 河北邯邢地区早白垩世岩浆作用及成矿意义 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- [6] 宋新宇, 冯钟燕. 太行山南段中生代侵入体微量元素地球化学及岩浆源区性质探讨 [J]. 华北地质矿产杂志, 1999, 14 (1): 1-17.
- [7] ZHANG J S, ZHANG J, ZHAI Y C. Geochemistry of hydrothermally altered rocks with gold mineralization hosted in alkaline complex in Hongshan area, Taihang Orogen, North China [J]. World Journal of Engineering, 2016, 13 (1): 23-34.
- [8] YAVUZ F, KUMRAL M, KARAKAYA N, et al. A Windows program for chlorite calculation and classification [J]. Computers & Geosciences, 2015, 81: 101-113.
- [9] WHITNEY D L, EVANS B W. Abbreviations for names of rock-forming minerals [J]. American (下转第 81 页)

- 输对城市空气质量及海域生态环境的可能影响 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [18] 邓丛蕊. 中国大气气溶胶中生物质燃烧的源追踪及灰霾的形成机制 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [19] XIAO R, CHEN X, WANG F, et al. The physicochemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(11): 244-249.
- [20] LASKIN A, COWIN J P, IEDEMA M J. Analysis of individual environmental particles using modern methods of electron microscopy and X-ray microanalysis [J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2006, 150(2): 260-274.
- [21] 张元勋, 王荫淞, 李德禄, 等. 上海冬季大气可吸入颗粒物的 PIXE 研究 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(Z): 1-5.
- [22] 牛生杰, 张澄昌. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶的化学组分和富集因子分析 [J]. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 264-268.
- [23] 中国环境监测总站. 中国元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] KYLLNEN K, KARLSSON V, RUOHO-AIROLA T. Trace element deposition and trends during a ten year period in Finland [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(7): 2260-2269.
- [25] GB3095-2012, 环境空气质量标准 [S].
- [26] 张芬芬, 王丽涛, 苏捷, 等. 邯郸市 PM_{2.5} 中含碳组分的特征及来源分析 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(8): 94-100.
- [27] ZHAO Y, GAO Y. Mass Size Distributions Of Water-soluble Inorganic And Organic Ions In Size-segregated Aerosols Over Metropolitan Newark In The Us East Coast [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(18): 4063-4078.

(责任编辑 王利君)

(上接第 75 页)

- Mineralogist*, 2010, 95 (1): 185-187.
- [10] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the Continental Crust [M]. In: RUDNICK R L (ed). *The Crust, Treatise on Geochemistry 3*. Amsterdam: Elsevier, 2003: 1-64.
- [11] MCDONOUGH W F, SUN S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120 (3-4): 223-253.
- [12] 权瑞, 董国臣, 缪广, 等. 太行山南段洪山矿化正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地球化学特征 [J]. *地质论评*, 2016, 62 (4): 1064-1080.
- [13] 赵平. 章村三井隔水层微观研究及煤系地层叶腊石的发现 [J]. *中国煤田地质*, 2007, 19 (6): 19-20.
- [14] 王夕明, 张景森, 张静, 等. 磁西煤系下岩溶热水水文地球化学特征及成因 [J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2009, 26 (3): 97-101.
- [15] 孙玉壮, 赵存良, 李彦恒, 等. 煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39 (4): 744-748.
- [16] DZ/T 0204-2002, 稀土矿产地质勘查规范 [S].

(责任编辑 王利君)