

何伟, 吴亮, 魏向成, 等. 宁东煤田中侏罗统延安组稀有稀散稀土元素地球化学特征及其对沉积环境的指示意义[J]. 岩矿测试, 2022, 41(6): 962-977.

HE Wei, WU Liang, WEI Xiangcheng, et al. Geochemical Characteristics of Rare, Dispersed, and Rare Earth Elements in the Middle Jurassic Yan'an Formation of the Ningdong Coalfield and Their Indication for a Sedimentary Environment[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(6): 962-977.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202111080169】

宁东煤田中侏罗统延安组稀有稀散稀土元素地球化学特征及其对沉积环境的指示意义

何伟^{1,2}, 吴亮^{1,2*}, 魏向成^{1,2}, 陶瑞^{1,2}, 宋扬^{1,2}

(1. 宁夏回族自治区矿产地质调查院, 宁夏 银川 750021;
2. 宁夏回族自治区矿产地质研究所, 宁夏 银川 750021)

摘要: 稀有稀散稀土元素(三稀元素)因性能和作用特殊,是重要的战略资源,同时因其特有的地球化学属性,在研究古气候、古水体和古沉积环境、沉积物源等方面具有重要的意义。前人针对宁东煤田研究发现,煤系伴生稀散元素 Ga 轻度富集,而稀土元素含量偏低。本次研究选取灵武、积家井两个典型矿区,在钻孔岩心中开展系统采样,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对延安组泥岩、砂岩以及煤层顶(底)板开展三稀元素含量测试,探讨煤系三稀元素富集成矿可能性,同时讨论延安组古沉积环境特征及物源区岩石性质。结果表明:宁东煤田中侏罗统延安组煤系三稀元素整体含量水平较低(仅有 Ga 元素最高含量 29.40μg/g,接近于 30.00μg/g 的最低工业品位)。稀有、稀散元素在延安组底部或细-粉砂岩、泥岩中的含量较高,与世界煤中的平均含量相比,稀有元素 Li、Nb、Ta、Rb、Cs、Zr 和稀散元素 Ga、In、Sc、Hf 为轻度富集或富集;REY(稀土元素+Y 元素)属于 LREY 富集型, Eu 呈明显的负异常。通过典型元素地球化学参数研究延安组古沉积环境, Rb、Sr 和 REY 指示古气候条件温湿, Li、Sr、Ga 指示为淡水沉积环境, Ce、Ce/La 反映缺氧的还原环境; REY 含量未受成岩作用影响,可以用于对原始沉积岩物源的判别。

关键词: 稀有稀散稀土元素; 电感耦合等离子体质谱法; 延安组; 地球化学特征; 古沉积环境; 物源

要点:

(1) 宁东煤田延安组煤系三稀元素含量较低(仅有 Ga 元素最高含量 29.40μg/g,接近于 30.00μg/g 的最低工业品位),均未达到矿床工业指标要求,不具有综合开发利用前景。

(2) 样品 Rb/Sr、(La/Yb)_N、REY 值相对较高, Eu 呈负异常, 古水温平均 29.90℃, Ceanom、Ce/La 平均值分别为-0.05 和 1.92,显示延安组沉积时期气候温湿,为缺氧的淡水、还原环境。

(3) 样品 Eu 呈负异常, Ce 无明显异常, LREY 富集, 物源主要来自上地壳, 混合有碱性玄武岩和花岗岩, 显示贺兰山地区岩浆岩、变质岩为延安组主要物源供给区域。

中图分类号: O657.63 文献标识码: A

“三稀元素”是稀有、稀散和稀土元素的总称。因三稀元素具有独特的性能和作用,在原子能、航空航天、半导体、电子技术等高科技领域具有广阔的应用前景,是重要的战略资源^[1]。除本身特殊的性能和用途以外,三稀元素因其特有的地球化学属性,在沉积富集过程中能够记录沉积物源、沉积环境、构造

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2022-02-15; 接受日期: 2022-03-23

基金项目: 宁夏重点研发计划重大(重点)项目(2020BFG02003, 2022BEG02013)

第一作者: 何伟, 硕士, 高级工程师, 主要从事固体矿产勘查及成矿规律、成矿预测研究。E-mail: pyhw1989@163.com。

通信作者: 吴亮, 硕士, 工程师, 主要从事煤田地质研究。E-mail: 406383536@qq.com。

背景等关键信息^[2-3]。如稀有元素 Rb、Sr 对古气候较为敏感;稀有元素 Li、Sr 和稀散元素 Ga 能反映沉积水体的盐度条件;稀土元素如 Ce 异常可以反映沉积环境的氧化还原条件,还可以用于对原始沉积物源的判别^[4-8]。因此,可以通过三稀元素含量、比值、特征值、配分模式、判别图解等,为古气候、古水体和古沉积环境恢复、沉积源岩等方面研究提供依据^[4-8]。近年来,中国已先后发现三稀资源矿产地 7 处,圈定找矿靶区 100 多个,取得丰硕的成果^[1]。而含煤岩系,因其特殊的沉积环境和富含有机质等特征,在煤层、夹矸、顶底板也伴生有三稀元素,并且已在国内外有开发利用先例^[9-13],世界上 50% 以上的工业用 Ge 来自煤^[10],煤型 Se 矿床主要赋存在石煤中^[9]。通过含煤岩系三稀元素地球化学特征研究,可以还原成煤环境,阐明含煤岩系区域地质历史演化等基本理论问题^[14]。

宁东煤田含煤面积约 10710km²,主要含煤地层为石炭系上统太原组、二叠系下统山西组和侏罗系中统延安组,埋藏 2000m 以浅含煤面积约 7256km²,累计查明煤炭资源/储量 277 亿吨,保有资源/储量 270 亿吨,预测总资源量为 1066 亿吨。现已建设成以煤炭、电力、煤化工三大产业为支撑,中国重要的千万千瓦级火电基地、煤化工基地和煤炭基地。近年来,一些学者针对宁东煤田煤系伴生三稀元素也开展了相关的研究。如赵存良(2015)^[15]研究发现 Ga 和 Rb 等元素在宁东煤田 2[#]煤中富集,含量均值分别为 18.88μg/g、33.14μg/g,而稀土元素含量(83.83μg/g)远低于中国煤的均值(135.89μg/g);刘元(2016)^[16]通过鄂尔多斯盆地西缘侏罗纪 15 个煤样微量元素测试分析,认为与中国煤中微量元素含量均值相比,宁东煤田煤中 Li、Sr、Rb、Ga 属轻度富集;秦国红等(2016)^[17]运用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对宁东煤田延安组 8 个煤样中稀土元素进行测试,得出稀土元素含量低于中国和世界煤中的均值,也低于上地壳值,呈轻微 Eu 负异常,轻微 Ce 正异常,侏罗系延安组主要为氧化的陆相环境;宁树正等(2017)^[18]统计得出灵武矿区延安组煤顶分层 Ga 平均含量达到 77.8μg/g。上述研究主要集中于对煤中部分微量元素的测试分析,样品采集相对较为分散,对于同一区域在垂向上开展样品的系统采集和元素含量测试不够,煤系地层整体的三稀元素含量水平、富集影响因素和通过三稀元素地球化学属性开展宁东煤田延安组沉积物源、沉积环境等方面的研究成果较少。

本文选取宁东煤田灵武矿区、积家井矿区作为样品采集点,其中灵武矿区位于煤田中部且靠近侏罗系赋存区域北部边界,而积家井矿区处于煤田南部,两个矿区样品具有一定的代表性。样品采自矿区勘查钻孔延安组岩心,以泥岩、砂岩为主,部分为煤层顶(底)板,采用 ICP-MS 法对样品开展稀有、稀散、稀土元素含量测试,通过元素含量分析宁东煤田中侏罗统延安组煤系伴生三稀元素赋存特征,探讨在该地区开展煤系三稀元素矿产资源调查的可能性。同时,根据部分稀有、稀散元素含量对沉积古气候条件、古盐度演变特征的反映,通过元素含量比值、特征值、配分模式、判别图解等,研究宁东煤田延安组沉积时期古沉积环境演化特征;根据稀土元素含量与特定地球化学特征值相关性分析,判定是否受成岩作用影响,并进一步讨论宁东煤田延安组物源区岩石性质,明确延安组煤系稀有、稀散、稀土元素的富集影响因素。

1 研究区地质矿产概况

宁东煤田构造位置处于柴达木—华北板块中南部华北陆块鄂尔多斯地块,鄂尔多斯西缘中元古代—早古生代裂陷和鄂尔多斯中生代拗陷交汇部位^[19](图 1)。煤田受贺兰山逆冲推覆构造系统和六盘山逆冲推覆构造系统的共同作用,并且位于两大构造系统的衔接过渡部分,使得原始连续近水平的含煤岩系发生断裂、褶皱,抬升剥蚀或沉降深埋,形成大小不等、构造形态和构造复杂程度各异的赋煤块段,控制煤系矿产资源的分布与保存^[16,20]。煤田北部以近南北向和北东向断裂为主,中部发育北西—北北西向、近南北向以及北东向三组断裂,南部发育北西—北北西向逆冲断层^[20]。煤田大部分区域被新生界所覆盖,在南部沿青铜峡—固原断裂、青龙山—平凉断裂有白口系、震旦系、寒武系、奥陶系等老地层出露,西部靠近黄河断裂分布有三叠系、侏罗系、白垩系。断裂和褶皱将赋煤区域分割成多个赋煤构造单元,可划分为 5 个古生代石炭—二叠纪煤矿区和 6 个中生代侏罗纪煤矿区(图 1)。

本次样品采集点灵武矿区位于煤田中部,积家井矿区位于煤田南部(图 1),含煤地层均为中侏罗统延安组,岩性有灰、灰白的长石石英质各粒级的砂岩,灰、灰黑色及黑色粉砂岩、泥质岩及少量的黏土岩(或根土岩),局部夹不规则的钙质粉砂岩或泥灰岩、碳质泥岩及煤层,主要出现在延安组中部。

灵武矿区延安组平均厚度 308.95m,含可采及

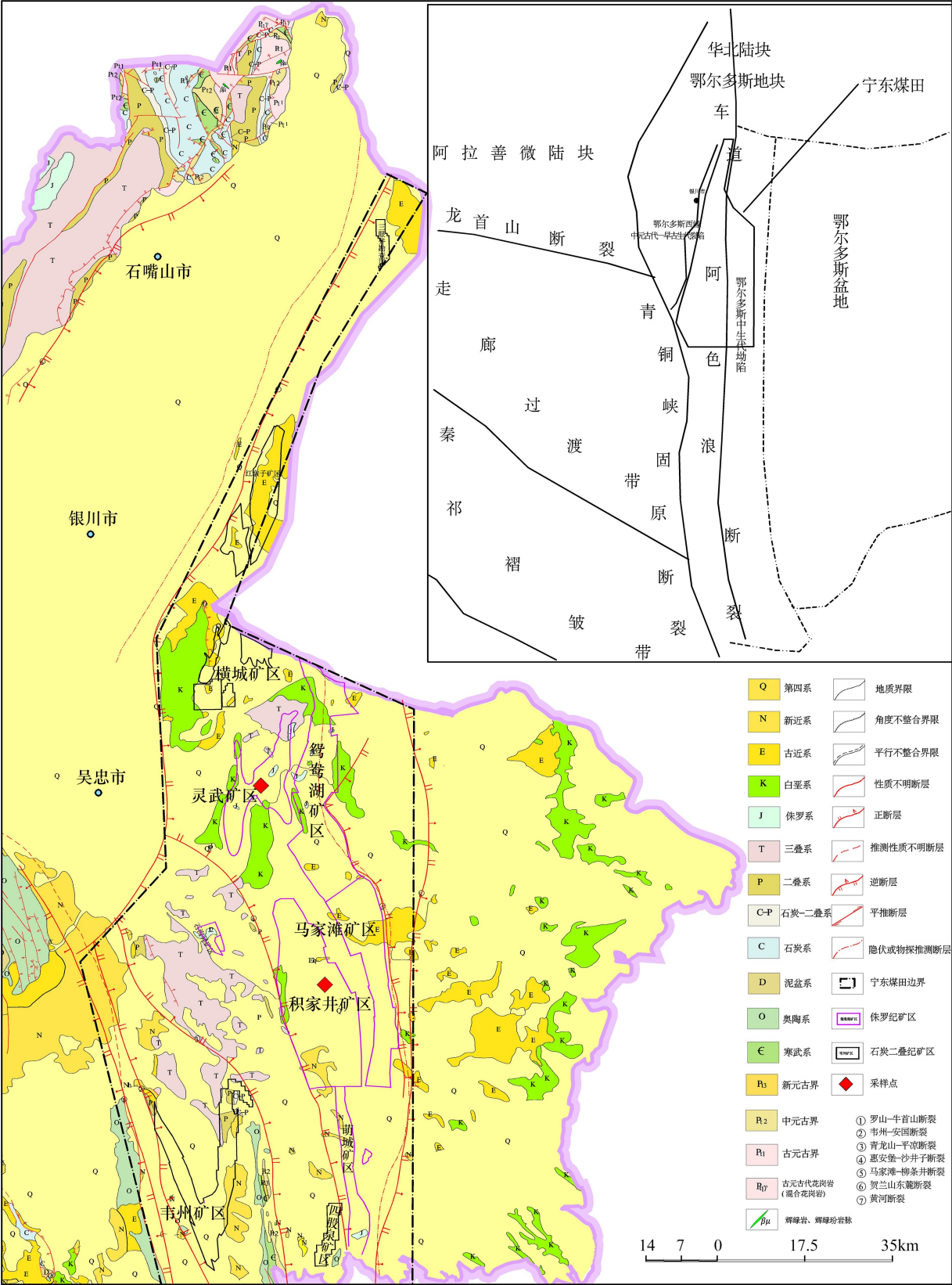


图1 宁东煤田区域地质特征简图

Fig.1 Brief map of regional geological characteristics of Ningdong Coalfield

局部可采煤层 15 层,煤层平均总厚度 22. 50m,含煤系数 7. 3%,主体构造为近南北宽缓、不对称褶皱及次级褶皱;积家井矿区延安组平均厚度 441. 50m,含煤和煤线 30 多层,煤层平均总厚度 23. 99m,矿区由一系列走向北北西或近南北向的褶皱群及与之相伴的断层组成。两个矿区煤层总体埋藏浅,煤质具低-特低灰、特低硫、特低-低磷、高化学活性、高机械强度等特点。

2 实验部分

2.1 实验样品

本次研究分别在灵武矿区、积家井矿区采集钻孔岩心样品 39 个(图 1),全部为中侏罗统延安组中下部泥岩和砂岩。编号为 ND-SX01 至 ND-SX20 的样品来自积家井矿区,采样深度为 531~905m,其中 ND-SX01、ND-SX06、ND-SX12、ND-SX18 岩性为炭质泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩,为煤层顶(底)板,其余样品为细砂岩、中-粗粒砂岩。编号为 ND-SX21 至 ND-SX39 的样品来自灵武矿区,采样深度为 335~617m,其中 ND-SX21、ND-SX26、ND-SX30、ND-SX32、ND-SX34、ND-SX36、ND-SX37、ND-SX39 岩性为泥岩、炭质泥岩、粉砂质泥岩,为煤层顶(底)板,其余样品为泥岩、粉砂岩、细砂岩、中粒砂岩。为了确保所采集的样品能代表地层本身的地球化学特征,便于更好地开展地层沉积物源信息和沉积环境研究,在野外采样过程中首先清理了岩心表面残留的钻井泥浆,并采集新鲜样品。

2.2 样品分析测试

样品测试单位为江苏地质矿产设计研究院实验室。

在室内,取适量所采样品在无污染环境中粉碎加工至 200 目,置于 500℃下高温加热 2h,以有效地去除有机质和水分对测试结果的影响。称取粉末样品 50mg,在氢氟酸和硝酸混合溶液中密封充分溶解,采用电感耦合等离子体质谱仪(iCAP QC 型,美国 ThermoFisher 公司)对样品中稀有元素 Li、Be、Rb、Sr、Nb、Cs、Ta、Zr,稀散元素 Sc、Ge、Ga、Cd、In、Tl、Hf、Se,稀土元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 以及 Y 共 31 种元素进行测试分析,测试方法主要依据《岩石矿物分析》(第四版),使用国际标准样品 BH-VO-1、BSR-1 及 AGV-1 进行校正,测试时温度为 24℃,相对湿度为 30%,分析精度优于 5%。

3 样品分析测试结果与讨论

3.1 稀有稀散元素富集特征

根据测定结果(表 1),稀有、稀散元素含量在两个矿区均较为接近,整体含量水平较低,与前人在宁东煤田的研究结果基本一致^[15-18]。稀散元素 Ga 最高含量为 29. 40μg/g(灵武矿区 ND-SX24 泥岩样品),接近于 30. 00μg/g 的煤矿伴生最低工业品位要求,其余 15 种元素均未达到矿床工业指标,不具有综合开发利用前景。此次结果与鄂尔多斯盆地西缘石炭—二叠系煤中的元素含量及盆地北部准格尔煤田煤中的元素含量存有一定差别,如贺兰山煤田石炭—二叠系煤 Li 含量达 294μg/g, Ga 含量达 40μg/g^[16],准格尔煤田 6 号煤层 Ga 含量平均为 45μg/g^[5],这可能是物源区母岩性质、沉积环境、有机质、构造和岩浆热液等诸多地质因素存在着一定的差别所导致的^[16]。

表 1 宁东煤田延安组样品稀有、稀散元素含量统计

Table 1 Statistics of rare and dispersed element contents in samples from Yan'an Formation, Ningdong Coalfield

元素类型	元素	积家井矿区			灵武矿区		
		最低值 (μg/g)	最高值 (μg/g)	平均值 (μg/g)	最低值 (μg/g)	最高值 (μg/g)	平均值 (μg/g)
稀有元素	Li	6. 00	65. 70	35. 40	19. 00	45. 70	35. 70
	Be	0. 72	6. 66	2. 70	1. 52	3. 27	2. 35
	Rb	14. 70	140. 00	105. 60	52. 60	140. 00	112. 70
	Sr	91. 50	308. 00	159. 10	116. 00	279. 00	165. 70
	Nb	3. 17	21. 00	13. 70	8. 15	19. 80	16. 30
	Cs	1. 00	9. 72	6. 10	2. 68	14. 10	8. 10
	Ta	0. 28	1. 73	1. 10	0. 60	1. 64	1. 30
	Zr	-	-	-	132. 00	275. 00	230. 00
稀散元素	Sc	3. 10	18. 50	12. 90	8. 00	1. 70	15. 90
	Ge	0. 60	2. 59	1. 30	0. 90	2. 24	1. 50
	Ga	5. 80	25. 10	19. 40	13. 50	29. 40	24. 30
	Cd	0. 02	0. 38	0. 10	0. 10	0. 26	0. 16
	In	0. 02	0. 09	0. 06	0. 05	0. 10	0. 08
	Tl	0. 57	1. 74	0. 82	0. 39	0. 78	0. 66
	Hf	-	-	-	4. 03	8. 33	6. 89
	Se	0. 00	0. 52	0. 15	0. 04	0. 37	0. 19

注:表中数据为本次实测结果,“-”表示未测试项目。

两个矿区不同深度样品中的元素含量存在一定差异。积家井矿区在深度 500~630m,元素含量均值显示较高;在深度 630~900m,元素含量均值显示出一个低值区间。而灵武矿区样品在深度 400~600m 元素含量较高,深度大于 600m 出现低值区间。不同岩性中元素含量并未显示出较大差距,除 Be、Tl 以外,其余元素在细-粉砂岩、泥岩中的含量

高于中、中-粗粒砂岩;灵武矿区稀有元素 Be、Rb、Sr、Cs、Nb、Ta 和分散元素 Cd、Tl、Se 含量最高值的样品均为煤层顶(底)板(样品 ND-SX26、ND-SX30、ND-SX39),岩性为泥岩或粉砂质泥岩。整体显示延安组沉积早期稀有、分散元素富集程度相对较低,而进入沉积中期,即在延安组中部煤层大量出现的范围内,元素富集程度升高;位于煤田中部的灵武矿区,元素富集程度相对更高,且静水环境形成的细粒沉积物和富含有机质沉积物更有利于稀有、分散元素的沉淀富集。

与上地壳平均丰度对比,样品稀有元素 Rb 和分散元素 Tl 含量与上地壳平均丰度相当,稀有元素 Li、Cs、Zr 和分散元素 Sc、Ga、Cd、In、Se、Hf 相对富集,稀有元素 Sr、Nb、Ta 表现为亏损(图 2)。其中,

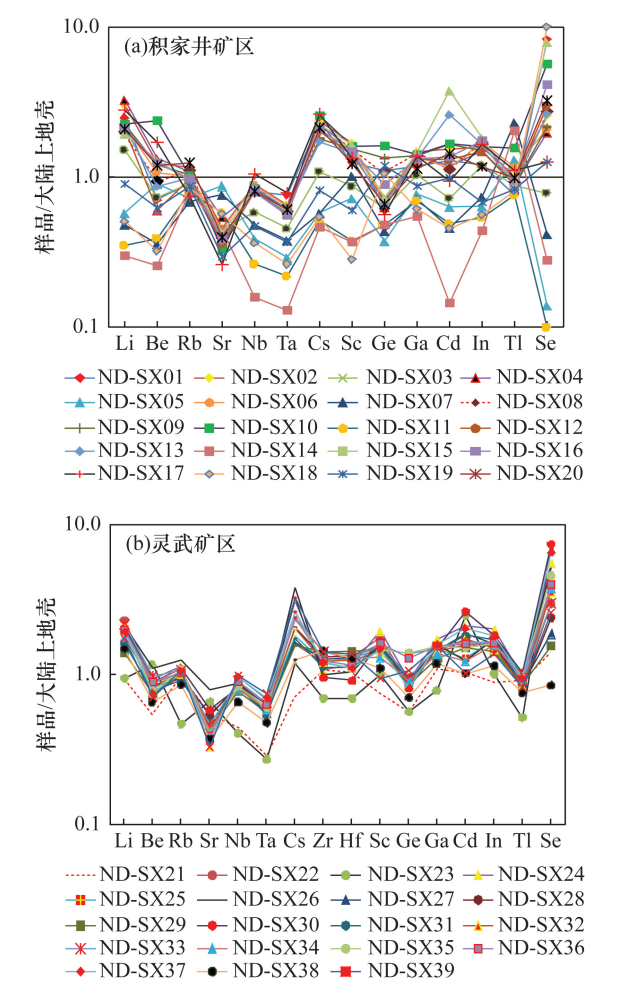


图2 宁东煤田延安组样品稀有、分散元素上地壳标准化织网图(上地壳数据引自文献[21])

Fig.2 Distribution patterns of rare and dispersed elements of samples in Yan'an Formation, Ningdong Coalfield (Upper crust-normalize data are from Reference [21])

Nb、Ta 在元素上地壳标准化织网图上呈现出 Nb-Ta 的“槽”,且积家井矿区“槽”谷更低(图 2),这可能与沉积源岩来自于钙碱性岩系有关^[18],说明了积家井矿区所在的矿区南部延安组沉积物源有较多的钙碱性源岩参与。

代世峰等(2014)根据富集系数(Concentration Coefficient,CC,为某地煤中微量元素含量/世界煤中微量元素含量比值),将煤中微量元素含量水平分为 6 个等级:CC<0.5 为亏损;0.5≤CC≤2 为正常范围;2<CC≤5 为轻度富集;5<CC≤10 为富集;10<CC≤100 为高度富集;CC>100 为异常高度富集^[2]。本次研究均为煤系地层样品,因此通过实测元素含量与世界煤中元素含量的比值计算出富集系数,并参照上述标准分析元素富集程度,其中世界煤中元素含量均值采用 Ketris 等(2009)^[22]统计的数据。根据计算结果(表 1),两个矿区分散元素中 Se 属于亏损,稀有元素 Sr、Be 和分散元素 Ge、Cd、Tl 属于正常范围,稀有元素 Li、Nb、Ta 和分散元素 Ga、In、Sc 属于轻度富集,稀有元素 Rb、Cs、Zr 和分散元素 Hf 属于富集(表 2)。

表2 宁东煤田延安组样品稀有分散元素平均富集系数

Table 2 Average enrichment coefficient of rare and dispersed elements in samples of Yan'an Formation, Ningdong Coalfield

元素	稀有分散元素平均富集系数			元素	稀有分散元素平均富集系数		
	积家井矿区	灵武矿区	平均值		积家井矿区	灵武矿区	平均值
Li	2.95	2.98	2.96	Sc	3.30	4.07	3.68
Be	1.70	1.47	1.58	Ge	0.58	0.68	0.63
Rb	7.54	8.05	7.79	Ga	3.35	4.18	3.75
Sr	1.45	1.51	1.48	Cd	0.57	0.75	0.65
Nb	3.71	4.39	4.04	In	2.03	2.51	2.26
Cs	6.07	8.10	7.06	Tl	1.31	1.05	1.18
Ta	4.05	4.50	4.27	Hf	-	5.74	5.74
Zr	-	6.39	6.39	Se	0.12	0.15	0.13

注:表中数据为本次研究样品实测元素含量除以世界煤中平均含量的比值;“-”表示该元素未测定。

3.2 稀土元素和钇元素的富集特征

稀土元素(REE)也称镧系元素,可根据原子电子层结构和物理化学性质分为 2 组,即轻稀土(LREE,包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu)和重稀土(HREE,包括 Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)。而第 39 号元素 Y,最外层电子的排列方式和化学性质与 REE 较为相似,且常与 REE 在矿床中共生,在研究中常与 REE 一起讨论并划分至 HREE 中。Seredin 等(2012)^[23]根据元素的地球化学特性将 REE 和 Y

(合并以 REY 表示)划分为轻稀土(LREY,包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm),中稀土(MREY,包括 Eu、Gd、Tb、Dy、Y)和重稀土(HREY,包括 Ho、Er、Tm、Yb、Lu)三类,这种分类方法综合了各元素物理、化学性质的相似性和差异性,能更好地描述传统稀土矿床中稀土元素的分布模式,近年来多用于煤和 REY 矿石中 REY 的分布特征研究^[7,15-17,24]。本次研究对象为煤系地层样品,因此在讨论样品 REY 分布特征时采用 Seredin 等的分类方法,而在沉积物源讨论部分为便于对比,在计算稀土元素总量时没有加入 Y 含量。样品 REY 的含量及地球化学参数列于表 3、表 4 中,其中 REY 为 REE 和 Y 含量之和, $(La/Lu)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Lu)_N$ 为相应元素球粒陨石标准化比值。

根据测试和计算结果(表 3 和表 4),积家井矿区延安组泥岩、砂岩中 REY 含量介于 65.49~376.61 $\mu\text{g/g}$,平均 215.70 $\mu\text{g/g}$;LREY 含量介于 48.89~308.50 $\mu\text{g/g}$,平均 168.25 $\mu\text{g/g}$;MREY 含量介于 11.27~58.16 $\mu\text{g/g}$,平均 40.01 $\mu\text{g/g}$;HREY 含量介于 2.42~10.67 $\mu\text{g/g}$,平均 7.43 $\mu\text{g/g}$ 。灵武矿区延安组泥岩、砂岩中 REY 含量介于 153.58~342.84 $\mu\text{g/g}$,平均 247.52 $\mu\text{g/g}$;LREY 含量介于 125.71~269.84 $\mu\text{g/g}$,平均 194.32 $\mu\text{g/g}$;MREY 含量介于 20.08~61.43 $\mu\text{g/g}$,平均 44.73 $\mu\text{g/g}$;HREY 含量介于 3.53~11.57 $\mu\text{g/g}$,平均 8.47 $\mu\text{g/g}$ 。

两个矿区 REY 含量明显高于中国煤中的均值(135.89 $\mu\text{g/g}$)^[9-10]、世界煤中的均值(68.47 $\mu\text{g/g}$)^[9-10]和上地壳 REY 值(168.4 $\mu\text{g/g}$)^[2],在泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩中含量普遍较高,最高值为粉砂岩样品(ND-SX15,376.61 $\mu\text{g/g}$),其次为炭质泥岩样品(ND-SX30,342.8 $\mu\text{g/g}$),煤田中部的灵武矿区 REY 含量普遍高于南部的积家井矿区。根据前述的元素富集系数分类,样品 REY 富集系数为 1.50~3.99,其中 LREY 平均富集系数 3.36,MREY 平均富集系数 2.82,HREY 平均富集系数 2.39,除元素 Ho、Tm 为正范围常外,其余均为轻度富集。

两个矿区 LREY 含量均较 MREY 和 HREY 高,REY、LREY、MREY、HREY 含量在两个矿区的分布特征较为接近。Seredin 等(2012)^[23]根据 $(La/Lu)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Lu)_N$ 的比值将 REY 分为三种富集类型,即:LREY 富集型, $(La/Lu)_N > 1$;MREY 富集型, $(La/Sm)_N < 1$ 且 $(Gd/Lu)_N > 1$;HREY 富集型, $(La/Lu)_N < 1$ 。经计算得出两个矿区样品 REY 地球化学参数(表 4),其中 $(La/Lu)_N$ 值

范围为 6.63~14.48,平均值 10.15,说明样品全部属于 LREY 富集型。

根据以上参数,两个矿区延安组泥岩和砂岩样品 REY 分布均属于 LREY 富集型,说明宁东煤田延安组煤系沉积物主要是陆源物质^[4,25-26]。样品 δEu 值为 0.60~1.15,平均值为 0.73,呈明显的负异常; δCe 值分布在 0.87~1.04 之间,平均值为 0.98,接近于 1,呈轻微的负异常或者基本属于正常,说明物源区相对稳定^[26]。

利用球粒陨石标准化值对样品进行标准化处理,同时为便于物源对比研究,收集了贺兰山地区古元古代花岗质片麻岩、古元古代花岗岩、贺兰山岩群孔兹岩、晚三叠世玄武岩 REY 含量数据并进行标准化处理。两个矿区延安组样品的稀土元素配分模式基本相似(图 3 中 a,b),均呈右倾的“V”字形,为 LREY 富集型。曲线 LREY 段(La-Sm)斜率较大,灵武矿区稍大于积家井矿区;MREY(Eu-Y)和 HREY 段(Ho-Lu)斜率较小,曲线平缓;说明 LREY 分馏程度较高,而 MREY 和 HREY 分馏程度较低,表明两个矿区母岩性质差别较小。在 Eu 处可见明显的“谷”,指示 Eu 负异常,而 Ce 处未见明显异常。

两个矿区 REY 配分模式整体上与贺兰山地区古元古代花岗质片麻岩、古元古代花岗岩、贺兰山岩群孔兹岩呈高度相似的特征,而个别样品(ND-SX14、ND-SX18、ND-SX21)的 Eu 负异常不明显并与晚三叠世玄武岩配分模式相似(图 3 中 a,b,c),整体上表明宁东煤田延安组沉积物源稳定,来源及母岩性质一致。宁东煤田延安组沉积岩物源可能主要为贺兰山地区孔兹岩系、古元古代花岗质片麻岩、古元古代花岗岩,有少部分物源可能来自于晚三叠世玄武岩。

4 稀有稀散稀土元素地球化学特征及其对沉积环境的指示

4.1 稀有稀土元素对古气候条件的指示

稀有元素 Rb、Sr 和 REY 含量及其比值对古气候条件具有一定的指示作用。Rb/Sr 高值表示气候湿润,而 Rb/Sr 低值则指示气候干旱^[27],两个矿区样品中 Rb/Sr 比值为 0.2~1.1,平均比值(0.7)相对较高,反映整体温湿的气候环境,但是比值跨度较大,部分砂岩、泥岩样品比值较低,说明在沉积期气候环境存在短暂的动荡变化; $(La/Yb)_N$ 高值指示温湿的气候环境,低值指示干热的气候环境^[4],样品中 $(La/Yb)_N$ 值为 6.31~17.11,均值为 9.97,

表 3 宁东煤田延安组样品稀土和钇元素含量

Table 3 Contents of REEs and yttrium in samples from Yan'an Formation, Ningdong Coalfield

序号	积家井矿区 样品编号	采样 深度(m)	样品岩性	元素含量(单位:μg/g)														
				La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	ND-SX01	531	炭质泥岩(煤层底板)	50.50	98.73	11.00	39.74	7.19	1.50	6.52	1.04	5.88	32.46	1.18	3.43	0.53	3.50	0.53
2	ND-SX02	607	中粒砂岩	50.60	98.80	11.19	40.91	7.70	1.65	6.82	1.11	6.07	33.65	1.19	3.39	0.53	3.33	0.52
3	ND-SX03	622	中-粗粒砂岩	42.69	82.80	9.53	35.99	6.66	1.51	5.94	0.92	4.97	24.35	0.93	2.48	0.42	2.47	0.39
4	ND-SX04	631	细砂岩	39.93	76.01	8.93	32.00	6.08	1.37	5.39	0.88	4.82	25.56	0.95	2.64	0.42	2.68	0.41
5	ND-SX05	655	中-粗粒砂岩	25.37	46.13	5.83	22.22	4.11	1.09	3.89	0.66	4.02	25.39	0.86	2.51	0.43	2.71	0.41
6	ND-SX06	681	粉砂岩(煤层顶板)	49.36	95.08	11.25	41.41	7.65	1.60	6.89	1.08	6.18	36.24	1.21	3.43	0.54	3.48	0.55
7	ND-SX07	691	中-粗粒砂岩	25.38	45.91	5.77	21.46	3.82	1.01	3.58	0.60	3.34	18.81	0.71	2.04	0.35	2.20	0.35
8	ND-SX08	717	细-粉砂岩	48.28	95.64	11.07	40.53	7.44	1.60	6.68	1.07	5.91	32.17	1.17	3.26	0.51	3.45	0.53
9	ND-SX09	717	细-粉砂岩	43.09	85.80	9.89	36.84	6.98	1.50	6.24	1.01	5.81	33.81	1.17	3.28	0.52	3.43	0.52
10	ND-SX10	751	粉砂岩	46.74	90.47	10.54	38.65	7.31	1.58	6.73	1.08	6.18	38.49	1.24	3.48	0.56	4.82	0.57
11	ND-SX11	766	中粒砂岩	18.80	36.90	4.29	15.10	2.60	0.73	2.33	0.36	1.98	10.34	0.37	1.04	0.21	1.15	0.21
12	ND-SX12	784	粉砂岩(煤层顶板)	49.40	97.92	11.14	40.53	7.49	1.61	6.83	1.06	6.01	32.91	1.18	3.35	0.52	3.42	0.51
13	ND-SX13	784	粉砂岩	42.93	85.36	9.89	36.53	6.74	1.50	6.21	1.01	5.68	31.15	1.13	3.14	0.50	3.29	0.51
14	ND-SX14	799	粗粒砂岩	12.65	21.22	2.67	10.52	1.83	0.65	1.63	0.29	1.58	9.75	0.33	0.94	0.19	1.06	0.18
15	ND-SX15	817	粉砂岩	74.05	148.60	16.33	58.62	10.91	2.29	9.67	1.46	7.61	37.13	1.41	3.80	0.56	3.63	0.55
16	ND-SX16	817	粉砂岩	48.18	93.54	10.75	39.23	7.13	1.58	6.43	1.03	5.65	36.01	1.53	3.10	0.49	3.08	0.48
17	ND-SX17	841	粗粒砂岩	46.55	82.93	8.88	30.70	5.16	1.05	4.80	0.78	4.79	30.62	0.99	2.98	0.50	3.28	0.50
18	ND-SX18	851	粉砂岩夹泥岩 (煤层顶板)	15.62	25.25	3.09	11.37	1.78	0.58	1.53	0.25	1.21	7.71	0.27	0.80	0.18	1.00	0.18
19	ND-SX19	872	中粒砂岩	37.82	70.21	8.34	31.16	5.54	1.11	4.82	0.73	3.85	20.90	0.76	2.12	0.36	2.12	0.35
20	ND-SX20	895	粉砂岩	52.07	99.20	11.28	41.70	7.59	1.42	6.52	1.01	5.50	31.96	1.06	3.04	0.49	3.11	0.47
积家井矿区样品元素含量平均值				41.00	78.83	9.08	33.26	6.09	1.35	5.47	0.87	4.85	27.47	0.98	2.71	0.44	2.86	0.44
积家井矿区样品元素平均富集系数				3.73	3.43	2.6	2.77	3.04	2.86	2.03	2.73	2.31	3.27	1.82	2.92	1.42	2.86	2.18

序号	灵武矿区 样品编号	采样深度 (m)	样品岩性	元素含量(单位:μg/g)														
				La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
21	ND-SX21	335	泥岩(煤层底板)	33.06	61.29	6.63	24.86	4.13	1.23	3.58	0.52	2.47	12.28	0.46	1.29	0.23	1.30	0.25
22	ND-SX22	339	泥岩	49.94	97.24	11.30	42.85	8.03	1.76	6.68	1.09	6.43	33.85	1.28	3.43	0.54	3.55	0.55
23	ND-SX23	346	泥岩	36.76	68.15	8.14	31.51	6.06	1.25	5.31	0.93	5.83	36.02	1.22	3.30	0.53	3.35	0.53
24	ND-SX24	362	泥岩	62.08	127.31	14.10	54.83	9.98	2.13	8.32	1.33	7.93	39.95	1.54	4.14	0.63	4.15	0.62
25	ND-SX25	366	中粒砂岩	42.16	81.67	9.58	35.17	6.36	1.35	5.21	0.81	4.29	20.55	0.81	2.18	0.35	2.17	0.35
26	ND-SX26	409	泥岩(煤层顶板)	51.07	97.36	11.08	41.04	7.62	1.55	6.48	1.05	6.31	34.56	1.27	3.45	0.53	3.49	0.53
27	ND-SX27	410	粉砂岩	54.21	105.32	12.11	46.74	8.51	1.84	7.27	1.14	6.61	31.73	1.27	3.40	0.51	3.35	0.51
28	ND-SX28	415	粉砂质泥岩	52.15	100.99	11.78	45.71	8.31	1.74	6.93	1.11	6.40	31.26	1.25	3.37	0.52	3.41	0.52
29	ND-SX29	420	细粒砂岩	44.93	89.00	10.60	40.75	7.92	1.77	6.77	1.13	6.90	35.26	1.37	3.68	0.57	3.72	0.55
30	ND-SX30	493	炭质泥岩(煤层底板)	65.31	125.54	14.02	55.07	9.91	2.03	8.48	1.36	8.23	41.33	1.64	4.36	0.65	4.28	0.64
31	ND-SX31	497	炭质泥岩	48.87	94.56	10.96	41.20	7.68	1.65	6.37	1.01	5.90	29.56	1.22	3.14	0.49	3.21	0.49
32	ND-SX32	516	粉砂质泥岩(煤层底板)	46.26	90.57	10.37	39.00	7.26	1.53	6.20	1.01	6.12	32.61	1.26	3.28	0.52	3.56	0.52
33	ND-SX33	521	粉砂质泥岩	51.47	101.99	11.64	43.13	8.10	1.65	6.80	1.12	6.77	35.14	1.35	3.66	0.56	3.67	0.56
34	ND-SX34	572	粉砂质泥岩(煤层底板)	40.51	79.55	9.20	34.56	6.50	1.39	5.62	0.91	5.43	28.99	1.10	2.97	0.48	3.07	0.48
35	ND-SX35	574	粉砂质泥岩	46.12	89.81	10.29	38.02	7.07	1.48	6.05	0.99	5.77	29.62	1.14	3.03	0.48	3.09	0.47
36	ND-SX36	587	粉砂质泥岩(煤层底板)	50.78	96.84	11.04	40.76	7.62	1.59	6.55	1.05	6.21	32.12	1.23	3.36	0.52	3.39	0.52
37	ND-SX37	596	粉砂质泥岩(煤层底板)	50.26	89.46	11.08	41.68	7.59	1.56	6.35	1.00	5.78	29.02	1.15	3.14	0.49	3.23	0.49
38	ND-SX38	612	细粒砂岩	30.42	56.62	6.77	26.88	5.03	1.10	4.18	0.69	3.88	21.16	0.78	2.20	0.37	2.37	0.38
39	ND-SX39	617	粉砂质泥岩(煤层顶板)	35.90	62.74	6.82	24.83	4.10	0.76	3.63	0.59	3.36	19.32	0.70	2.05	0.36	2.33	0.38
灵武矿区样品元素含量平均值				46.96	90.32	10.39	39.40	7.25	1.54	6.15	0.99	5.82	30.23	1.16	3.13	0.49	3.19	0.49
灵武矿区样品元素平均富集系数				4.27	3.93	2.97	3.28	3.63	3.29	2.28	3.10	2.77	3.60	2.15	3.36	1.59	3.19	2.46
两矿区全部样品元素含量平均值				43.90	84.42	9.72	36.25	6.65	1.44	5.80	0.93	5.33	28.81	1.07	2.91	0.47	3.02	0.46
两矿区全部样品元素平均富集系数				3.99	3.67	2.78	3.02	3.33	3.07	2.15	2.91	2.54	3.44	1.98	3.13	1.50	3.02	2.31

注：表中数据为本次实测结果,富集系数为本次实测元素含量除以世界煤中平均含量得出,世界煤中平均含量引自文献[21]。

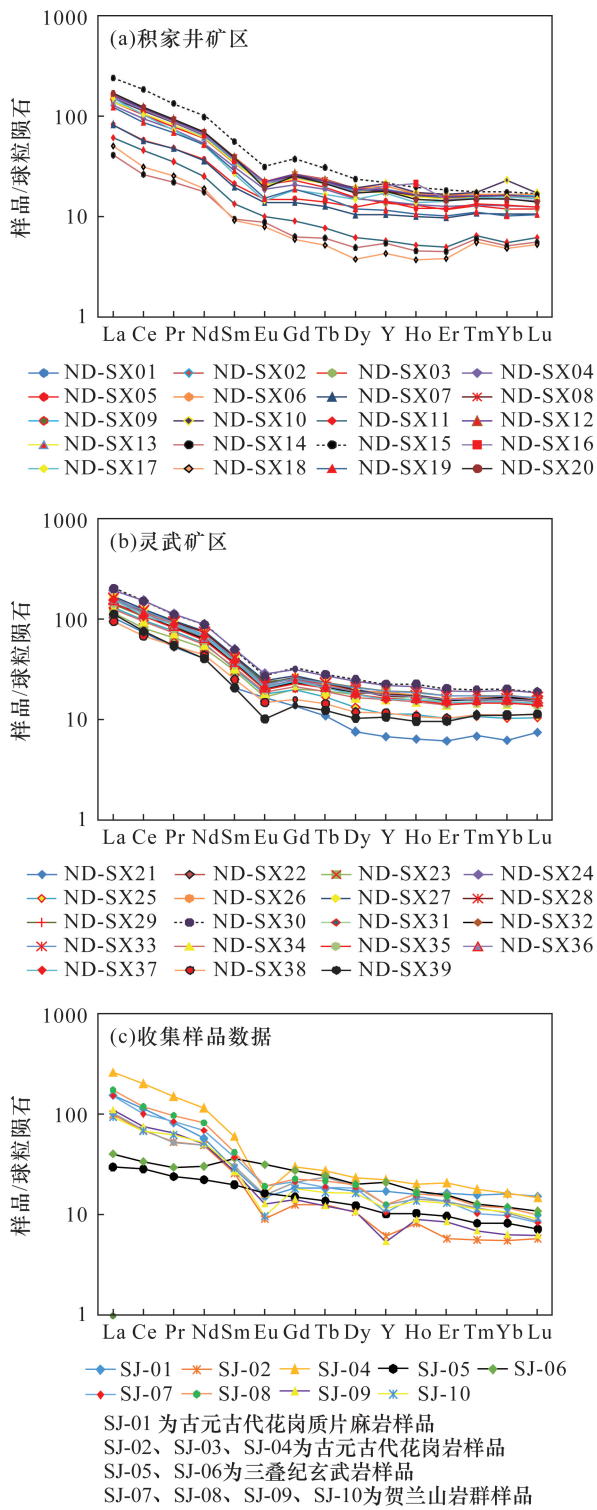
表 4 宁东煤田延安组样品稀土和钇元素地球化学参数

Table 4 Geochemical parameters of REEs and yttrium in samples from Yan'an Formation, Ningdong Coalfield

序号	积家井矿区 样品编号	LREY	MREY	HREY	REY	(Gd/Lu) _N	(La/Lu) _N	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δEu	δCe	Ceanom
1	ND-SX01	207.16	47.41	9.16	263.72	1.68	10.42	10.24	4.13	1.65	0.69	1.00	-0.04
2	ND-SX02	209.19	49.29	8.95	267.43	1.93	11.61	11.67	4.03	1.94	0.74	0.99	-0.04
3	ND-SX03	177.68	37.70	6.68	222.05	1.69	10.43	10.04	4.13	1.62	0.73	0.97	-0.05
4	ND-SX04	162.94	38.02	7.10	208.06	1.22	6.63	6.31	3.88	1.16	0.83	0.91	-0.08
5	ND-SX05	103.66	35.05	6.92	145.63	1.60	9.60	9.57	4.06	1.60	0.67	0.97	-0.05
6	ND-SX06	204.75	51.98	9.21	265.94	1.33	7.86	7.79	4.18	1.32	0.84	0.91	-0.07
7	ND-SX07	102.34	27.34	5.65	135.33	1.63	9.84	9.45	4.08	1.56	0.69	1.00	-0.03
8	ND-SX08	202.96	47.42	8.91	259.29	1.52	8.80	8.48	3.89	1.47	0.69	1.00	-0.03
9	ND-SX09	182.60	48.37	8.92	239.89	1.52	8.80	6.54	4.02	1.13	0.69	0.98	-0.04
10	ND-SX10	193.71	54.07	10.67	258.44	1.45	9.80	11.00	4.55	1.63	0.91	0.99	-0.03
11	ND-SX11	77.69	15.74	2.98	96.41	1.70	10.28	9.74	4.15	1.61	0.69	1.00	-0.03
12	ND-SX12	206.47	48.43	8.99	263.89	1.56	9.03	8.81	4.01	1.53	0.71	1.00	-0.03
13	ND-SX13	181.45	45.55	8.56	235.56	1.14	7.38	8.04	4.36	1.24	1.15	0.88	-0.10
14	ND-SX14	48.89	13.90	2.71	65.49	2.26	14.48	13.74	4.27	2.15	0.68	1.03	-0.02
15	ND-SX15	308.50	58.16	9.95	376.61	1.72	10.76	10.56	4.25	1.69	0.71	0.99	-0.04
16	ND-SX16	198.83	50.70	8.68	258.21	1.24	10.07	9.57	5.68	1.18	0.65	0.98	-0.05
17	ND-SX17	174.22	42.04	8.24	224.51	1.12	9.56	10.52	5.52	1.23	1.08	0.87	-0.10
18	ND-SX18	57.11	11.27	2.42	70.81	1.78	11.66	12.00	4.29	1.83	0.66	0.95	-0.06
19	ND-SX19	153.07	31.42	5.72	190.20	1.80	11.99	11.27	4.31	1.69	0.62	0.99	-0.04
20	ND-SX20	211.85	46.42	8.16	266.43	1.57	10.18	9.74	4.42	1.51	0.67	1.01	-0.03
积家井矿区平均值		168.25	40.01	7.43	215.70	1.57	9.96	9.75	4.31	1.54	0.76	0.97	-0.05

序号	灵武矿区 样品编号	LREY	MREY	HREY	REY	(Gd/Lu) _N	(La/Lu) _N	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δEu	δCe	Ceanom
21	ND-SX21	129.98	20.08	3.53	153.58	1.84	14.25	17.11	5.03	2.22	0.98	1.00	-0.05
22	ND-SX22	209.36	49.80	9.36	268.52	1.55	9.71	9.49	3.91	1.52	0.73	0.99	-0.04
23	ND-SX23	150.62	49.33	8.92	208.88	1.30	7.50	7.40	3.82	1.28	0.67	0.95	-0.07
24	ND-SX24	268.31	59.67	11.09	339.06	1.71	10.67	10.09	3.91	1.62	0.71	1.04	-0.02
25	ND-SX25	174.95	32.20	5.86	213.02	1.91	12.88	13.09	4.17	1.94	0.72	0.98	-0.04
26	ND-SX26	208.18	49.94	9.27	267.39	1.57	10.32	9.87	4.21	1.50	0.67	0.99	-0.04
27	ND-SX27	226.89	48.59	9.05	284.53	1.82	11.34	10.91	4.01	1.75	0.72	0.99	-0.05
28	ND-SX28	218.94	47.44	9.08	275.46	1.72	10.85	10.30	3.95	1.64	0.70	0.98	-0.05
29	ND-SX29	193.20	51.83	9.90	254.93	1.57	8.71	8.14	3.57	1.47	0.74	0.98	-0.04
30	ND-SX30	269.84	61.43	11.57	342.84	1.71	10.99	10.28	4.14	1.60	0.68	1.00	-0.05
31	ND-SX31	203.26	44.49	8.54	256.29	1.67	10.71	10.28	4.01	1.60	0.72	0.98	-0.04
32	ND-SX32	193.46	47.48	9.15	250.09	1.53	9.52	8.75	4.01	1.40	0.70	1.00	-0.04
33	ND-SX33	216.32	51.48	9.80	277.61	1.56	9.88	9.44	4.00	1.49	0.68	1.00	-0.03
34	ND-SX34	170.31	42.35	8.10	220.76	1.49	8.99	8.88	3.92	1.48	0.70	0.99	-0.04
35	ND-SX35	191.31	43.91	8.22	243.43	1.64	10.48	10.06	4.10	1.58	0.69	0.99	-0.04
36	ND-SX36	207.05	47.51	9.02	263.58	1.61	10.41	10.10	4.19	1.56	0.69	0.98	-0.04
37	ND-SX37	200.07	43.70	8.49	252.27	1.67	11.04	10.51	4.16	1.59	0.69	0.91	-0.08
38	ND-SX38	125.71	31.01	6.09	162.81	1.41	8.59	8.65	3.81	1.42	0.73	0.95	-0.07
39	ND-SX39	134.39	27.66	5.81	167.86	1.22	10.12	10.39	5.50	1.26	0.60	0.97	-0.07
灵武矿区平均值		194.32	44.73	8.47	247.52	1.61	10.37	10.20	4.13	1.57	0.71	0.98	-0.05
两矿区样品平均值		180.95	42.31	7.93	231.20	1.59	10.15	9.97	4.22	1.55	0.73	0.98	-0.05

注: $\delta\text{Eu}=\text{Eu}/(\text{Sm}_\text{N}\times\text{Gd}_\text{N})^{0.5}$; $\delta\text{Ce}=\text{Ce}/(\text{La}_\text{N}\times\text{Pr}_\text{N})^{0.5}$; Ce 异常指数 $\text{Ceanom}=\lg[3\text{Ce}_\text{N}/(2\text{La}_\text{N}+\text{Nd}_\text{N})]$, 式中的 Ce_N 、 La_N 、 Nd_N 分别为 Ce_N 、 La_N 、 Nd_N 值与北美页岩标准化之后的值; 每个矿区平均值为该矿区所采样品的算术平均值, 全部样品平均值为两个矿区所有样品的算术平均值。



球粒陨石数据引自文献[21],收集样品数据引自文献[19]。
图 3 宁东煤田延安组样品稀土和钇元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 3 Chondrite-normalized distribution patterns of REEs and yttrium in samples from Yan'an Formation, Ningdong Coalfield (Chondrite data are from Reference [21], sample data are collected from Reference [19])

指示温湿的气候;REY 高值指示温湿的气候,较低指示寒冷干旱的气候^[28],样品 REY 是上地壳 REY 的 1.4 倍,是北美页岩 REY 的 1.5 倍,是球粒陨石 REY 的 80 倍,表明沉积期间气候较为温湿;Eu 负异常通常指示温暖湿润的气候环境,样品 δEu 值平均为 0.73,仅 2 个样品 $\delta\text{Eu} \geq 1$,整体上具有明显的负异常,指示温湿的气候环境。根据以上参数,宁东煤田延安组沉积时期古气候的反映信息基本一致,即整个延安组沉积时期以温湿气候为主,在局部较短时间范围内存在干热与温湿气候环境的动荡变化。

根据碳酸盐岩中的 Sr 质量分数与温度的经验公式可以估算古水温^[26],即 $w(\text{Sr}) = 2578 - 80.8T$ 。通过样品 Sr 含量估算出古水温为 28.09~30.77℃,平均为 29.90℃,说明气候较为温暖,与微量、稀土元素指示结果一致。

4.2 稀有稀土元素对古盐度的指示

稀有元素 Li、Sr 和稀散元素 Ga 等含量对沉积时期水体盐度具有很好的指示作用^[4]。前人对古盐度的判别参数给出了参考标准。田景春等(2016)认为在淡水环境中, Li 元素含量小于 90 $\mu\text{g/g}$, Sr 元素含量为 100~500 $\mu\text{g/g}$, Ga 元素含量大于 17 $\mu\text{g/g}$ ^[29];邓宏文等(1993)、郑荣才等(1999)、文华国等(2008)认为, Sr 元素含量小于 300 $\mu\text{g/g}$ 为淡水环境,大于 500 $\mu\text{g/g}$ 为咸水环境^[30-32]。根据本次两个矿区延安组样品测试结果, Li 元素含量为 6.00~65.68 $\mu\text{g/g}$,平均 35.55 $\mu\text{g/g}$; Sr 元素含量为 91.50~308.00 $\mu\text{g/g}$,平均 162.40 $\mu\text{g/g}$; Ga 元素含量为 9.32~29.44 $\mu\text{g/g}$,平均 21.85 $\mu\text{g/g}$ 。三种元素含量均满足淡水沉积环境含量标准值区间,说明宁东煤田延安组整体为淡水沉积环境。

4.3 稀土元素对氧化还原条件的指示

REY 中 Ce 异常可以灵敏地反映沉积环境的氧化还原条件, δCe 值大于 1 为正异常,表示还原环境; δCe 值小于 0.95 为负异常,表示氧化环境^[4]; Ce 异常指数 $\text{Ceanom} > -0.1$ 反映水体呈现缺氧的还原环境,而 $\text{Ceanom} < -0.1$ 则反映水体呈现氧化环境^[33]; $\text{Ce/La} < 1.5$ 时为氧化环境, $1.5 \leq \text{Ce/La} < 1.8$ 时为贫氧环境, $\text{Ce/La} \geq 1.8$ 时为厌氧环境^[34]。两个矿区样品的 δCe 值为 0.87~1.04,平均为 0.98; Ceanom 值为 -0.10~-0.02,平均为 -0.05; Ce/La 值为 1.62~2.05,平均为 1.92。说明宁东煤田延安组沉积时整体为缺氧的还原环境。

4.4 稀有稀土元素对沉积岩物源属性判别的指示

沉积岩的 REY 特征对物源区岩石地球化学特征具有重要的示踪意义^[7,35-37]。但是在开展沉积源岩研究之前,需要确定成岩作用对 REY 富集的影响,本次所采集的样品 δCe 与 δEu 、 ΣREE 、 $(\text{La}/\text{Nd})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 散点图数据杂乱无章,均无明显相关性(图 4 中 a,b,c,d),说明 REE 未受成岩作用影响^[38],其记录的信息可以用于对原始沉积岩物源的判别。

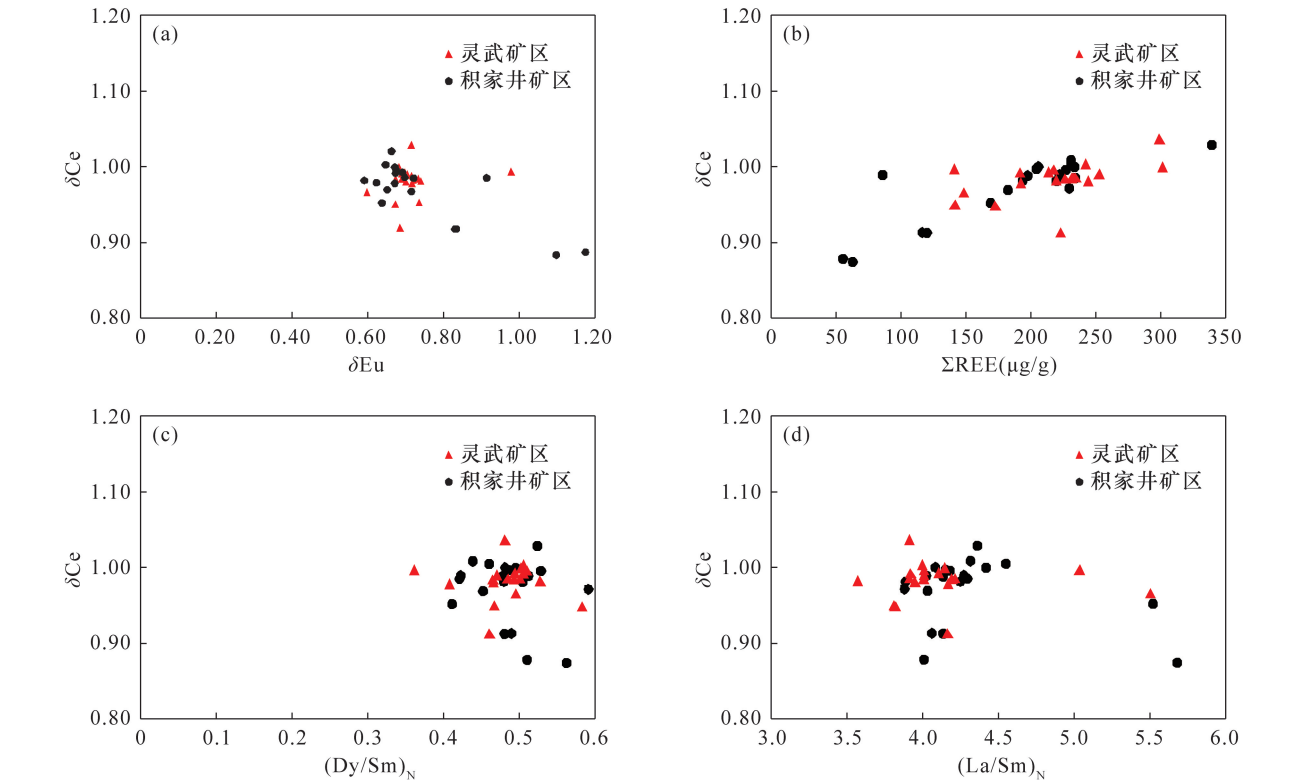
Eu 的异常特征是物质来源的重要鉴别参数。源岩为花岗岩,则沉积岩表现为 Eu 负异常,而源岩为玄武岩 Eu 异常特征不明显^[37];LREY 富集、Eu 负异常、Ce 无异常,则说明源岩为长英质岩^[38-39];源岩为地幔物质 Sm/Nd 比值 0.260~0.375,为大洋玄武岩 Sm/Nd 比值 0.234~0.425,而源于壳层的花岗岩类以及各类沉积岩 Sm/Nd 比值一般小于 0.3^[40]。宁东煤田两个矿区样品 δEu 均呈明显的负异常,Ce 无明显异常,LREY 富集,Sm/Nd 比值平均为 0.18,说明沉积岩物源以壳源花岗岩及相关沉积岩为主,样品的 REY 配分模

式基本一致,整体表明宁东煤田延安组沉积岩物源稳定,来源及母岩性质较为一致。

稀有元素 Nb、Ta 属于高场强元素,在两个矿区均出现严重亏损,在元素上地壳标准化织网图上呈现出 Nb-Ta 的“槽”(图 2),表现出一定钙碱性岩系的源岩特征;稀有元素 Li (均值 35.55 $\mu\text{g/g}$)、Cs (均值 7.10 $\mu\text{g/g}$) 和 稀 散 元 素 Cd (均 值 0.13 $\mu\text{g/g}$) 相对富集,说明泥质含量较高,也有火山岩物源的可能;而 稀 散 元 素 Se 的 富 集 (均 值 0.17 $\mu\text{g/g}$),也说明沉积岩物源可能有火山岩的参与^[18,41-42]。

La/Yb- ΣREE 图解中大部分样品落入花岗岩与沉积岩重叠区,少量落在玄武岩区和沉积岩区,这与上述元素结果相一致,说明沉积岩物源主要来自上地壳长英质源区,并混合有碱性玄武岩和花岗岩,这与前述物源属性较为一致(图 5)。

根据本次元素含量测定结果,两个矿区样品稀有、 稀 散 元 素 含 量 之 间 未 出 现 明 显 的 相 关 性,不 同 元 素 含 量 比 值 以 及 相 关 地 球 化 学 特 征 值 与 各 元 素 含 量 之 间 也 未 见 明 显 相 关 性,仅 有 Sc、Ga、Cd、In 四 种 稀 散 元 素 与 REE 总 量 出 现 一 定 的 相 关 性 (图 6 中



a— δCe - δEu 相关性图; b— δCe - ΣREE 相关性图; c— δCe -(Dy/Sm)_N 相关性图; d— δCe -(La/Sm)_N 相关性图。
图 4 宁东煤田延安组样品 REY 地球化学参数相关性图(图中 ΣREE 未计入 Y 含量)
Fig. 4 Relationship between geochemical parameters of REY in Yan'an Formation, Ningdong Coalfield
(Total rare earth elements without yttrium)

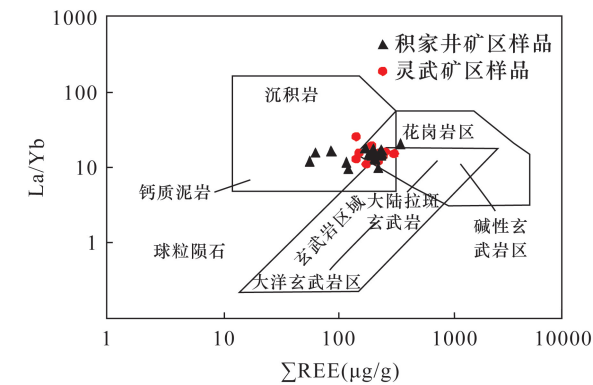


图5 宁东煤田延安组下部泥岩样品源岩 La/Yb-ΣREE 判别图解(图中 ΣREE 未计入 Y 含量,底图据文献[42])

Fig. 5 La/Yb-ΣREE discriminant diagram for source rock of mudstone samples from lower Yan'an Formation, Ningdong Coalfield (Total rare earth elements without yttrium, base map is cited from Reference[42])

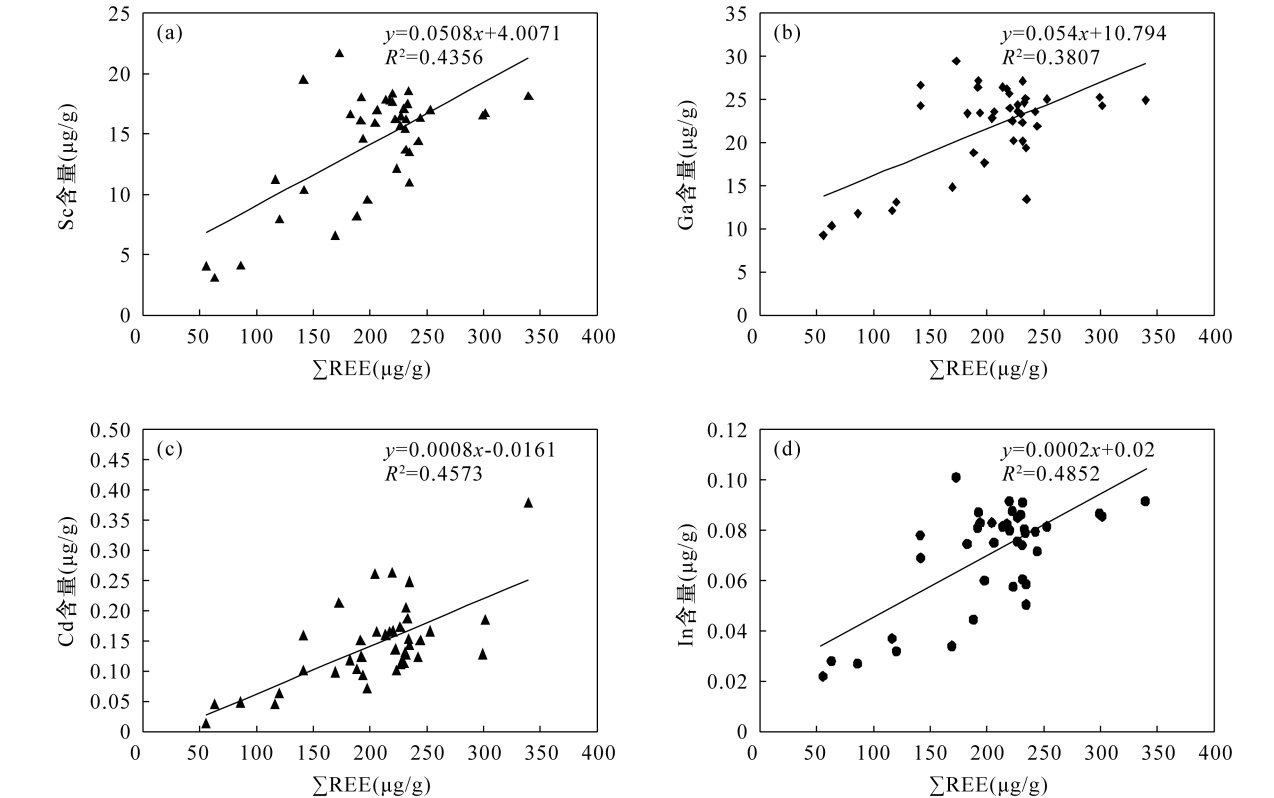
a,b,c,d),说明元素的富集主要受原始沉积岩物源的控制,沉积环境、古气候条件对稀有、分散元素的富集影响作用不大。

宁东煤田属鄂尔多斯盆地西缘,侏罗纪沉积盆

地为继承性凹陷盆地,基底为三叠纪地层,延安期以河流-湖沼相沉积为主。盆地北部紧邻的贺兰山中段汝箕沟地区也分布有侏罗系延安组,并且延安组岩性、沉积充填序列等特征与鄂尔多斯盆地具有相似性,延安组古水流也指向鄂尔多斯盆地内部,所含砾石和砂级碎屑的成分为片麻岩、变粒岩及古花岗岩,来自盆地边缘断裂以北贺兰山岩群^[43]。本研究通过元素地球化学特征证实了宁东煤田延安组沉积岩物源主要来自贺兰山地区岩浆岩、变质岩,说明宁东煤田乃至鄂尔多斯盆地西缘延安组沉积岩物源主要为贺兰山地区孔兹岩系、古元古代花岗质片麻岩、古元古代花岗岩,少部分物源来自晚三叠世玄武岩。

5 结论

本次研究选取了宁东煤田灵武、积家井两个典型矿区,通过钻孔岩心系统采集中侏罗统延安组泥岩、砂岩以及煤层顶(底)板样品,采用 ICP-MS 法开展稀有、分散、稀土元素含量测试,结果显示三稀元素整体含量水平较低,且均未达到矿床工业指标要求,不具有综合开发利用前景。与世界煤中元素



(a)Sc-ΣREE 相关性图; (b)Ga-ΣREE 相关性图; (c)Cd-ΣREE 相关性图; (d)In-ΣREE 相关性图。

图6 宁东煤田延安组样品稀土元素总量与部分分散元素含量相关性图(图中 ΣREE 未计入 Y 含量)

Fig. 6 Relationship between ΣREE and the contents of some dispersed elements in Yan'an Formation, Ningdong Coalfield (Total rare earth elements without yttrium)

平均含量对比,两个矿区稀散元素中 Se 属于亏损,稀有元素 Sr、Be 和稀散元素 Ge、Cd、Tl 属于正常范围,稀有元素 Li、Nb、Ta 和稀散元素 Ga、In、Sc 以及 REY 属于轻度富集,稀有元素 Rb、Cs、Zr 和稀散元素 Hf 为富集;煤田中部的灵武矿区元素含量普遍高于南部的积家井矿区。在延安组中部煤层顶(底)板,元素富集程度升高,显示静水环境形成的细粒沉积物和富含有机质的沉积物更有利于稀有、稀散元素的沉淀富集。

稀有、稀散、稀土元素含量对古气候条件、古沉积环境指示作用明显,稀土元素含量未受成岩作用影响,可以用于对原始沉积岩物源的判别。根据典型元素地球化学参数对古沉积环境和沉积岩物源性进行了恢复,结果表明:宁东煤田延安组沉积时期气候温湿,整体为缺氧的淡水沉积、还原环境;沉积岩物源较为稳定,来源及母岩性质一致,以壳源花岗岩及相关沉积岩为主,混合有碱性玄武岩;经稀土元素配分模式对比,位于煤田西北的贺兰山地区古元古代花岗质片麻岩、古元古代花岗岩、贺兰山岩群孔兹岩为延安组主要物源供给区域;稀有、稀散、稀土元素的富集主要受原始沉积岩物源控制,水动力条件和有机质含量对元素含量有一定影响,沉积环境、古气候条件影响作用不大。

6 参考文献

[1] 王登红,王瑞江,孙艳,等.我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J].地球学报,2016,37(5):569-580.
Wang D H, Wang R J, Sun Y, et al. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2016, 37(5): 569-580.

[2] Bhatia M R. Rare earth elements geochemistry of Australian Paleozoic graywacks and mudstones: Provenance and tectonic control [J]. Sedimentary Geology, 1985, 45: 97-113.

[3] Sylvestre G, Laure N T E, Djibril K N G, et al. A mixed seawater and hydrothermal origin of superior-type banded iron formation (BIF)-hosted Kouambo iron deposit, Palaeoproterozoic Nyong Series, southwestern Cameroon: Constraints from petrography and geochemistry [J]. Ore Geology Reviews, 2017, 80: 860-875.

[4] 王旭影,姜在兴.苏北东台坳陷古新统阜宁组三段微量、稀土元素地球化学特征及其地质意义[J].地质论评,2021,67(2):355-366.

Wang X Y, Jiang Z X. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in the 3rd Member of Paleocene Funing Formation in Dongtai Depression, North Jiangsu Basin, and their geological significance [J]. Geological Review, 2021, 67(2): 355-366.

[5] 徐波,胡碧瑶,顾智鹏,等.西湖凹陷平湖斜坡带平湖组微量元素和稀土元素地球化学特征及其地质意义[J].西安石油大学学报(自然科学版),2021,36(2): 28-37,49.
Xu B, Hu B Y, Gu Z P, et al. Geochemical characteristics of trace elements and rare earth elements of Pinghu Formation in Pinghu slope belt of Xihu Sag and their geological significance [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2021, 36(2): 28-37, 49.

[6] 朱文博,张训华,曲中党,等.赣东-浙西下寒武统荷塘组稀土元素特征及其地质意义[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(2):88-99.
Zhu W B, Zhang X H, Qu Z D, et al. REE composition and its geological implications of the Hetang Formation mudstones in the East Jiangxi and West Zhejiang, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(2): 88-99.

[7] 张天福,孙立新,张云,等.鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J].地质学报,2016,90(12): 3454-3472.
Zhang T F, Sun L X, Zhang Y, et al. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(12): 3454-3472.

[8] 张茜,余谦,王剑,等.应用 ICP-MS 研究川西南龙马溪组泥页岩稀土元素特征及沉积环境[J].岩矿测试,2018,37(2):217-224.
Zhang Q, Yu Q, Wang J, et al. Application of ICP-MS to study the rare earth element characteristics and sedimentary environment of black shale in the Longmaxi Formation in the southwestern Sichuan Basin [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(2): 217-224.

[9] 代世峰,任德贻,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.
Dai S F, Ren D Y, Zhou Y P, et al. Coal-hosted rare metal deposits: Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1707-1715.

[10] Seredin V V, Dai S F, Sun Y Z, et al. Coal deposits as

- promising sources of rare metals for alternative power and energy efficient technologies [J]. Applied Geochemistry, 2013, 31(2): 1-11.
- [11] 王臻,赵芝,邹新勇,等. 赣南浅变质岩岩石地球化学特征及稀土成矿潜力研究[J]. 岩矿测试, 2018, 37(1): 96-107.
- Wang Z, Zhao Z, Zou X Y, et al. Petrogeochemical characteristics and metallogenetic potential of epimetamorphic rocks in South Jiangxi Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(1): 96-107.
- [12] 代世峰,任德贻,李生盛. 内蒙古准格尔超大型镓矿床的发现[J]. 科学通报, 2006, 51(2): 177-185.
- Dai S F, Ren D Y, Li S S. Discovery of supermassive gallium deposit in Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(2): 177-185.
- [13] 刘东娜,曾凡桂,赵峰华,等. 山西省煤系伴生三稀矿产资源研究现状及找矿前景[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 1-7.
- Liu D N, Zeng F G, Zhao F H, et al. Status and prospect of research for three type coal-associated rare earth resources in coal measures in Shanxi Province [J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 1-7.
- [14] 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(2): 181-193.
- [15] 赵存良. 鄂尔多斯盆地与煤伴生多金属元素的分布规律和富集机理[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
- Zhao C L. Distribution and enrichment mechanism of multimetallic elements associated with coal in Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [16] 刘亢. 鄂尔多斯盆地西缘煤系矿产资源共生组合特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- Liu K. Combination characters of coal series mineral resources in the west margin of Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016.
- [17] 秦国红,邓丽君,刘亢,等. 鄂尔多斯盆地西缘煤中稀土元素特征[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6): 8-14.
- Qin G H, Deng L J, Liu K, et al. Characteristics of rare earth elements in coal in western margin of Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6): 8-14.
- [18] 宁树正,邓小利,李聪聪,等. 中国煤中金属元素矿产资源研究现状与展望[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2214-2225.
- Ning S Z, Deng X L, Li C C, et al. Research status and prospect of metal element mineral resources in China [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2214-2225.
- [19] 宁夏回族自治区地质调查院. 中国区域地质志——宁夏志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- Ningxia Hui Autonomous Region Geological Survey Institute. Regional geology of China—Ningxia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [20] 曹代勇,徐浩,刘亢,等. 鄂尔多斯盆地西缘煤田构造演化及其控制因素[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 410-427.
- Cao D Y, Xu H, Liu K, et al. Coalfield tectonic evolution and its controlling factors at the western margin of Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(2): 410-427.
- [21] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution revisited: Tectonic setting and secular trends [J]. The Journal of Geology, 1991, 99: 1-21.
- [22] Ketris M P, Yudovich Y E. Estimations of clarkes for Carbonaceous biolithes: World average for trace element contents in black shales and coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78: 135-148.
- [23] Seredin V V, Dai S F. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 94(5): 67-93.
- [24] 陈健,陈萍,刘文中,等. 淮北煤田煤中镧系元素和钇的地球化学——“岩浆侵入对淮北海沟西煤中稀土元素分布的影响”的商榷[J]. 高校地质学报, 2015, 21(1): 172-176.
- Chen J, Chen P, Liu W Z, et al. Geochemistry of lanthanide and yttrium in coals from the HuaiBei coalfield: A discussion on influence of magmatic intrusion on the distribution of REE in coals at western Huagou, HuaiBei [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(1): 172-176.
- [25] 郭东旭,刘琰,李自静,等. 应用电感耦合等离子体质谱技术研究牦牛坪矿床宽长岩化蚀变矿物微量元素特征[J]. 岩矿测试, 2020, 39(6): 896-907.
- Guo D X, Liu Y, Li Z J, et al. Determination of trace element compositions of altered minerals in fenitization veins by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 896-907.
- [26] 蒋赞,潘世乐,秦彩虹,等. 柴达木盆地北缘平台地区下干柴沟组下段稀土元素特征及物源分析[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(11): 1537-1547.
- Jiang Y, Pan S L, Qin C H, et al. Characteristics and

- provenance analysis of rare earth elements in the lower section of Xiaganchaigou Formation in the platform area of the northern margin of Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(11): 1537–1547.
- [27] 史冀忠, 牛亚卓, 许伟, 等. 银额盆地石板泉西石炭系白山组碳酸盐岩地球化学特征及其环境意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 680–693.
- Shi J Z, Niu Y Z, Xu W, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Carboniferous Baishan Formation carbonate in Shibquanxi of Yingen—Ejin Banner Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(3): 680–693.
- [28] 马风华, 张勇, 潘进礼, 等. 六盘山盆地白垩系马东山组泥页岩稀土元素地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2021, 67(1): 209–217.
- Ma F H, Zhang Y, Pan J L, et al. Geochemical characteristics of rare earth element and their geological significance of mud-shale in Cretaceous Madongshan Formation, Liupanshan Basin [J]. *Geological Review*, 2021, 67(1): 209–217.
- [29] 田景春, 张翔. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- Tian J C, Zhang X. *Sedimentary geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [30] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993.
- Deng H W, Qian K. *Sedimentary geochemistry and environmental analysis* [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993.
- [31] 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 R C, Liu M Q. Study on paleosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 20–25.
- [32] 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1): 114–120.
- Wen H G, Zheng R C, Tang F, et al. Reconstruction and analysts of palaeosalinity and paleo-environment of the Chang 6 Member in the Gengwan region, Ordos Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008, 28(1): 114–120.
- [33] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1–2): 12–32.
- [34] 熊小辉, 王剑, 余谦, 等. 富有机质黑色页岩形成环境及背景的元素地球化学反演: 以渝东北地区田坝剖面五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. *天然气工业*, 2015, 35(4): 25–32.
- Xiong X H, Wang J, Yu Q, et al. Element geochemistry inversion of the environment and background of organic-rich black shale formations: A case study of the Wufeng—Longmaxi black shale in the Tianba Section in northeastern Chongqing[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(4): 25–32.
- [35] 万秋, 李延河, 王利民, 等. 北淮阳晓天火山岩盆地片麻状花岗岩成岩年代学及地球化学特征[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(4): 620–630.
- Wan Q, Li Y H, Wang L M, et al. The age and geochemical characteristics of neoproterozoic gneissic moyite in the Xiaotian Basin [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(4): 620–630.
- [36] 李欣慰, 李超, 周利敏, 等. 贵州正安县奥陶系—志留系界线碳质泥岩 Re—Os 同位素精确厘定及其古环境反演[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(2): 251–261.
- Li X W, Li C, Zhou L M, et al. Accurate determination of the age of the carbonaceous mudstone of the Ordovician–Silurian boundary in Zheng'an County, Guizhou Province by Re–Os isotope dating method and its application in paleoenvironmental inversion [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(2): 251–261.
- [37] 李娟, 于炳松, 郭峰. 黔北地区下寒武统底部黑色页岩沉积环境条件与源区构造背景分析[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1): 20–31.
- Li J, Yu B S, Guo F. Depositional setting and tectonic background analysis on lower Cambrian black shales in the north of Guizhou Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 20–31.
- [38] Cullers R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian–Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies [J]. *Lithos*, 2000, 51(3): 181–203.
- [39] 李振宏, 董树文, 渠洪杰, 等. 宁武—静乐盆地侏罗系碎屑岩地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2013, 59(4): 637–655.
- Li Z H, Dong S W, Qu H J, et al. Geochemistry of Jurassic detrital rocks and geological significance in Ningwu Jingle Basin [J]. *Geological Review*, 2013, 59(4): 637–655.
- [40] 陈兴, 彭成龙, 陈建书, 等. 右江盆地中三叠世碎屑岩地球化学特征及其物源分析: 以贵州册亨地区为例[J]. *高校地质学报*, 2020, 26(6): 639–655.
- Chen X, Peng C L, Chen J S, et al. Geochemistry and provenance of the middle Triassic clastic rocks in the Youjiang Basin, Ceheng, Guizhou [J]. *Geological Journal*

of China Universities,2020,26(6):639-655.

[41] 雒昆利,潘云唐,王五一,等. 南秦岭早古生代地层含
硒量及硒的分布规律[J]. 地质论评,2001,47(2):
211-217.
Luo K L, Pan Y T, Wang W Y, et al. Selenium content
and distribution pattern in the Palaeozoic strata in the
southern Qinling Mountains [J]. Geological Review,
2001,47(2):211-217.

[42] 吴赛赛,赵省民,邓坚. 漠河盆地中侏罗统漠河组泥
岩元素地球化学特征及其地质意义:以 MK-3 井为
例[J]. 地质科技情报,2016,35(3):17-27.
Wu S S, Zhao X M, Deng J. Geochemical characteristics
of elements of the mudstones in middle Jurassic Mohe
Formation in the Mohe Basin and their geological
implications; A case from drilling hole MK-3 [J].
Geological Science and Technology Information, 2016, 35
(3):17-27.

[43] 张参,刘池洋,王建强,等. 中侏罗世延安期汝箕沟地
区与鄂尔多斯盆地沉积关系探讨[J]. 石油地质与工
程,2010,24(2):13-16,20.
Zhang C, Liu C Y, Wang J Q, et al. Discussion on
sedimentary relationship between Rujigou area and Ordos
Basin in Yan'an age of mid-Jurassic [J]. Petroleum
Geology and Engineering, 2010, 24(2):13-16, 20.

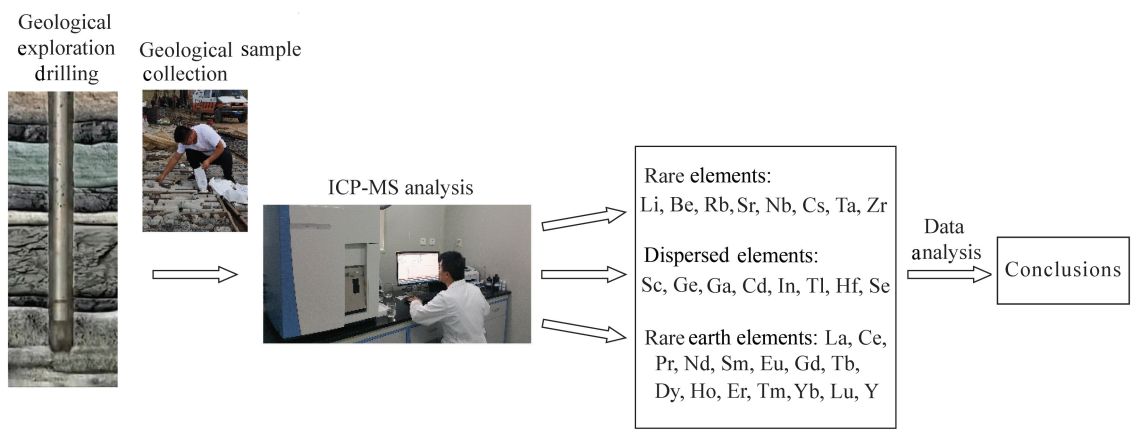
Geochemical Characteristics of Rare, Dispersed, and Rare Earth Elements in the Middle Jurassic Yan' an Formation of the Ningdong Coalfield and Their Indication for a Sedimentary Environment

HE Wei^{1,2}, WU Liang^{1,2*}, WEI Xiangcheng^{1,2}, TAO Rui^{1,2}, SONG Yang^{1,2}

(1. Ningxia Mineral Geological Survey Institute, Yinchuan 750021, China;
2. Ningxia Mineral Geology Research Institute, Yinchuan 750021, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The contents of rare, dispersed, and rare earth elements in the Yan' an Formation of Ningdong Coalfield are low, which does not meet the requirements of industrial indicators of the deposit and cannot be exploited comprehensively.
- (2) The Rb/Sr ratio, (La/Yb)_N, and REY (REEs+yttrium) are relatively high, and δEu is negative. The average ancient water temperature is 29. 90℃. The Ce anomaly and the Ce/La ratio are -0. 05 and 1. 92, respectively, indicating that the climate of the Yan' an Formation is warm and humid during deposition, and it is a fresh water deposition and reduction environment with hypoxia.
- (3) The sample Eu has a negative anomaly, Ce has no obvious anomaly, LREY is enriched, the provenance is mainly from the upper crust, mixed with alkaline basalt and granite. It is inferred that magmatic rocks and metamorphic rocks in Helanshan area are the main source areas of the Yan' an Formation.



ABSTRACT

BACKGROUND: Rare, dispersed, and rare earth elements are important strategic resources because of their special performance and function. At the same time, because of its unique geochemical properties, it is of great significance in the study of paleoclimate, paleo-water and paleo-sedimentary environment, and sediment sources. Previous studies have found that Ga in the Ningdong Coalfield is slightly enriched and rare earth element content is low.

OBJECTIVES: To explore the possibility of enrichment and mineralization of rare, dispersed, and rare earth elements in the coal series of the Yan’ an Formation of Middle Jurassic in the Ningdong Coalfield, and discuss the characteristics of paleosedimentary environment and properties of provenance rock.

METHODS: Systematic sampling was carried out in the core of boreholes from the Lingwu and Jijiajing mining areas of the Ningdong Coalfield. ICP–MS was used to determine the content of rare, dispersed, and rare earth elements in mudstone, sandstone and top (bottom) plate of the Yan’ an Formation.

RESULTS: The overall content of rare, dispersed, and rare earth elements in the Yan’ an Formation of the Ningdong Coalfield is low, which do not meet the requirements of the industrial indicators of the deposit and cannot be exploited comprehensively. The highest content of Ga is 29.40μg/g, which is close to the lowest industrial grade of 30.00μg/g. Compared with the average content of elements in world coal, rare elements Li, Nb, Ta, Rb, Cs, Zr and dispersed elements Ga, In, Sc, Hf are slightly enriched or enriched. The distribution of rare earth elements shows LREY type, and significant negative anomaly of Eu.

CONCLUSIONS: Rb, Sr and REY indicate the humidity of paleoclimate conditions, Li, Sr and Ga represent the freshwater deposition environment, and Ce, Ce/La reflect the anoxic reducing environment. The REY content is not affected by diagenesis and can be used to discriminate the original sediment source.

KEY WORDS: rare, dispersed and rare earth elements; inductively coupled plasma–mass spectrometry; Yan’ an Formation; geochemical characteristics; paleosedimentary environment; provenance