徐卫平,李斌凯,李雯霞,等. 柴北缘中段煤系地层铷元素富集特征研究[J]. 盐湖研究,2026,34(2):79-92.
Xu W P, Li B K, Li W X, et al. Study on the enrichment characteristics of rubidium in the coal-bearing strata in the middle section of the northern margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2026, 34(2): 79-92.
DOI:10.3724/j.yhyj.2025077
CSTR:32273.14.j.yhyj.2025077

柴北缘中段煤系地层铷元素富集特征研究

徐卫平[1],李斌凯[2],李雯霞[2*],韩文华[2],祁昭林[1],张世佳[3],赵金成[3]

(1. 青海大学 地质工程学院,青海 西宁 810016; 2. 中国科学院青海盐湖研究所,盐湖资源绿色高值利用重点实验室,青海 西宁 810008; 3. 青海煤炭地质勘查院,青海 西宁 810000)

摘 要:铷元素(Rb)在诸多高新科技领域具有关键作用,其需求量逐年增加。柴北缘中段是煤系地层分布区,其地层主要为侏罗系沉积地层。近年来,大量研究显示煤系地层富集铷锂铯等资源元素,但铷等元素在沉积地层的富集过程尚不清晰。因此,文章对柴达木盆地北缘大煤沟煤矿西侧钻孔(ZK14-1)进行了岩芯微量元素和稀土元素地球化学特征研究,探讨了该区沉积地层的演化特征、构造环境,尝试阐明在成岩过程中铷的富集规律。结果显示:Rb(142.3 μg/g)、Cs(14.2 μg/g)、Li(44.6 μg/g)、Ga(25.5 μg/g)、Th(22.3 μg/g)等微量元素的含量较高,均高于中国大陆沉积物元素丰度值,为稀有金属矿化提供了物质基础。元素相关性显示:Rb与Cs、Li、Be等元素成矿相关性较强;与Sc、V、Co、Ni、Cu、Zn元素相关性较弱。根据V/Cr、Ni/Co、V/(V + Ni)比值结果综合判断沉积过程处于氧化-贫氧-厌氧环境。Rb等元素的物质来源主要为塔塔楞岩体经风化-剥蚀-搬运-沉积过程将含矿元素通过地表水或地下径流迁移至煤系地层富集。研究结果为铷矿床的勘查研究工作提供了一定的基础。

关键词:煤系地层;铷元素;富集过程;地球化学;柴北缘中段

中图分类号:P632 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-858X(2026)02-0079-14

铷(Rb)作为一种关键战略性金属,因其具有极其活泼的化学性质和流体活动性,被广泛应用于高新科技领域[1-3]。根据美国地质调查局(USGS)数据,全球铷资源主要分布在非洲南部(纳米比亚、津巴布韦)、北美洲(加拿大)、澳大利亚和中国,以硬岩型和盐湖型为主[4]。2023年探明储量不到20万吨,截至目前,未发现显著新增储量[5]。目前,铷在高新科技产业的需求量越来越大,呈现供不应求的局面[6]。而我国正处于现代化建设的关键时期,相较于发达国家较成熟的高新技术产业链还有所欠缺,因此,当前我国对铷资源的需求更为迫切[7,8]。根据统计及预测,近五年铷铯资源在我国的需求量将呈指数增长,铷铯资源供给成为高新技术产业发展面临的巨大挑战[9,10]。因此,铷资源的勘查和合理开发对国家经济的稳定发展至关重要[11]。

我国铷资源可分为三种类型,即硬岩型、卤水型和热液型,此外,还有沉积型等特殊类型,总储量约116万吨(Rb_2O)[12,13]。硬岩型铷资源主要分布在江西,约占99%,其次在新疆、广东、内蒙古、甘肃、河南也有少量分布[13]。卤水型和热液型铷铯资源主要分布在西藏扎布耶、拉果错、麻米错、青海察尔汗盐湖、东西台吉乃尔湖、一里坪盐湖、大小柴旦湖、四川平落坝和湖北江陵等地区[12,14-16]。青藏高原是我国盐湖的集中分布区,其中85个盐湖中有十多个Rb_2O和Cs_2O资源量达到大型及中型矿床规模[12]。整体来看,我国目前已探明的铷资源还没有独立的铷矿床,均为伴生矿床,以固体矿为主;盐湖及地下卤水中所蕴藏的铷资源还没有进行详细的勘查开发,目前只对高品位的西藏麻米错、拉果错、扎布耶进行了详查[5]。铷作为碱金属元素,很少以单矿物形式产出,常与锂、铍、铯、铌、钽等元素,尤其是同为碱金属主族的钾元素伴生[17]。

朱镇源等对可可西里热泉研究发现,热泉中铷含量从山坡到山脚呈现数量级增加的现象。垂直涌

收稿日期:2025-09-18;**修回日期:**2025-11-03
基金项目:国家自然科学基金项目(42572114);青海省自然科学基金项目(2024-ZJ-722);青海省昆仑英才"拔尖人才"项目(李斌凯)
作者简介:徐卫平(1998—),男,硕士研究生,研究方向:矿产普查与勘探。Email:xuwp34773018@163.com。
通信作者:李雯霞(1987—),女,博士,工程师,主要从事盐湖锂资源成矿规律研究。Email:liwx@isl.ac.cn。

出的热泉中铷含量低于侧向流出的热泉，虽然不同区域热泉中铷含量变化较大，但其元素地球化学行为具有较强的一致性。通过对热泉中 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 和 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 的比值分析，发现热泉中铷一方面经浅循环淋滤的硅酸盐化产物而富集，另一方面经岩浆水的水岩交换作用而富集，再加之区域强烈干旱，蒸发浓缩作用也是铷等资源富集的一个因素[18]。张军等发现岩体随着岩浆演化程度的增加，铷含量升高，认为铷的富集受岩浆分异演化程度的控制和岩浆与热液的相互作用[19-22]。另外，顾连兴等发现，花岗岩 Rb 富集可能会受到岩浆源区的影响，认为高分异的天河石花岗岩会强烈富集 Rb[20,23-25]。同样，陈祉卫等对新疆将军山天河石花岗岩 Rb 富集成因进行了分析，发现 Rb 富集不仅与岩浆分异结晶、强烈的热液作用有关，新构造运动也有利于 Rb 富集[25,26]。

最近研究发现煤系地层也能富集铷等稀有金属元素。ZHAO 等对柴北缘鱼卡煤田、山西宁武煤田（Ikeh Tobechukwu Justin）、安徽淮南煤田（WANG Weicheng）煤系地层进行了元素地球化学行为研究，发现在煤系地层中铷、铯、锂等元素的富集程度极高，且在煤燃烧产物中能进一步富集；另外发现，这些富集元素赋存在黏土矿物和碳酸盐矿物中[27-29]。FU 等利用测井约束的岩石物理模型对哈尔乌素煤矿煤系地层锂等元素的区域地球化学富集特征进行了探讨，发现超厚煤系地层中锗和锂的载体矿物主要为铝土矿和高岭土[30]。曹默然利用逐级化学提取法（SCEE）对滇东黔西地区煤系地层中稀有金属元素赋存状态进行了研究，发现稀有元素主要以硅酸盐态赋存，少量以硫化物态和难溶矿物态赋存[31]。杨天洋等对黔西煤系关键金属富集层的时空分布进行了研究，发现煤系地层稀有金属元素的富集层主要为煤层顶底板、夹矸、灰岩间夹层[32]。郑雪等对鲁西地区煤系关键金属富集特征进行研究，发现锂是鲁西地区富集范围最广、富集程度最高的金属元素，其富集的主要因素是热液流体[33]。陈文韬等利用 X 射线荧光光谱仪（XRF）和电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）等分析技术对山东省宁汶煤田煤系稀有金属的富集特征进行了研究分析，发现沉积地层中陆源碎屑物质主要来源于长英质和中性火成岩[34]。魏强等对乌兰图嘎和云南临沧煤型锗矿床进行研究，发现煤系地层中富集 Ge、W、Au 等关键金属，主要赋存在煤层有机质中，且各种元素均赋存于不同的载体矿物[35,36]。代世峰等发现煤系中稀有金属一般都是多种元素共生富集，对黔西晚二叠世煤系凝灰岩层稀土元素富集模式进行研究，发现降落后的火山灰经历了表生风化作用，在水的作用下凝灰岩层顶部样品中元素向下迁移，后期出渗型流体与凝灰岩发生水岩作用，导致下部稀土元素随流体迁移至凝灰岩层富集[37]。尽管前人对 Rb 等稀有金属元素的富集机制开展了部分研究，但欠缺系统性研究。

本文所选取的柴北缘中段大煤沟地区是近年来发现的煤炭资源富集区，且在煤系层发现关键金属元素偏高的情况[38]。煤系层富含植物化石、孢粉、地球化学特征等，是研究古环境的天然试验场。多年来，已经对该区沉降-埋藏史、层序地层和煤层发育等有较多研究，但对煤系中关键金属元素的富集特征和物源并没有系统性研究[39-41]。因此，本文从微量元素地球化学特征角度出发，以柴北缘大煤沟煤矿西侧钻孔岩芯为研究对象，尝试通过钻孔岩芯信息来揭示 Rb 的富集机制，并讨论其富集过程。

1 地质背景

柴北缘位于柴达木盆地东北部，大煤沟煤矿西侧地处柴北缘中段，达肯大坂山东南，毗邻大煤沟煤矿[42]。大煤沟煤矿地区地层发育较全，古元古代地层主要出露于盆地四周山区，西部、南部基本被第四系地层覆盖，东部为出露齐全的侏罗系剖面，包括小煤沟组、大煤沟组、石门沟组和采石岭组地层（图1）。研究区构造形态总体为向北缓倾的单斜，但断裂构造发育，盆地基底为古元古界达肯大坂群的绿泥石片岩和花岗片麻岩[40,43]。

受印支运动的影响，下侏罗统柴达木盆地整体呈现伸展的构造格局，柴北缘地区受拉张应力的影响发育了系列断陷盆地[44,45]。下侏罗统至中侏罗统初，受塔里木地块板块活动的影响，柴北缘整体由原先的拉张应力转变为挤压应力，西部开始抬升，盆地也随之演化为断-坳复合盆地，在全吉地区形成了以大煤沟地区为沉积中心，向四周超覆沉积的特征[46-48]。其中大煤沟煤矿地区中-新生代构造发育，伴有规模较大的区域性逆冲推覆构造，控制着区内的构造格局。上侏罗统时期受挤压应力的影响，柴北缘总体处于挤压状态，研究区隆起，地层遭受不同程度的剥蚀。中、下侏罗统岩性为深灰色-灰绿色含煤层、页岩及碎屑沉积，惯称“黑侏罗”，地层中植物化石丰富；上侏罗统为棕红色泥质砂岩、泥岩，惯称“红侏罗”[49]。

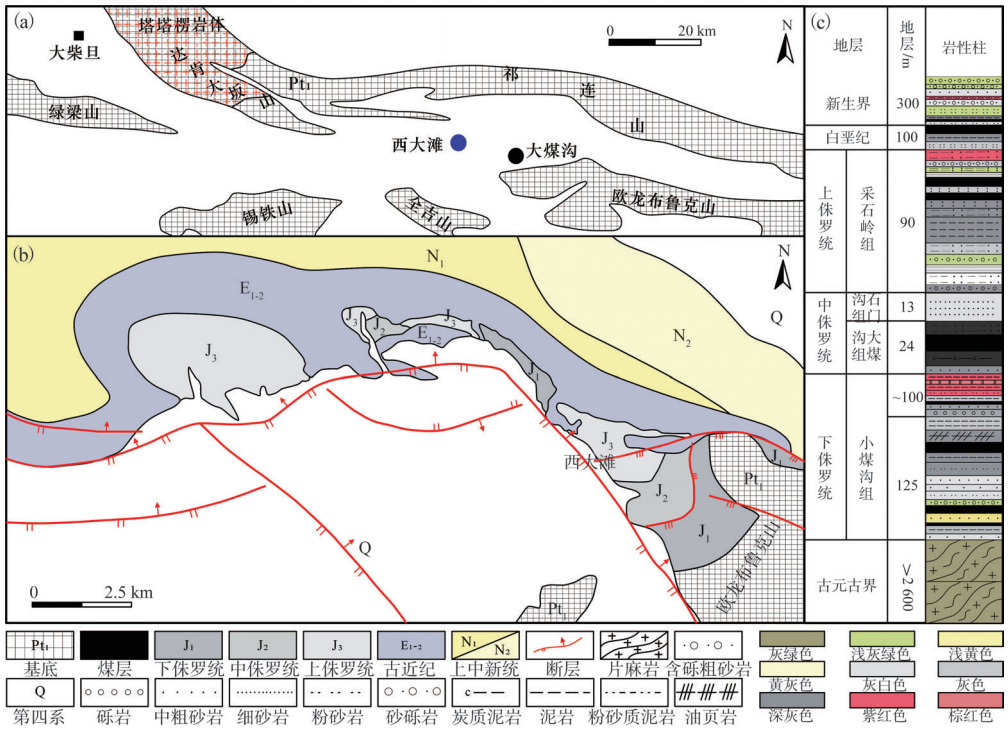


图1　柴北缘大煤沟煤矿地区地质简图[据闫晟(2013);黄献好等(2019)修改][39,41]

Fig. 1　Geological map of the Dameigou coal mine area of the northern margin of Qaidam Basin[39,41]

2　样品采集与分析方法

ZK14-1钻井位于青海柴达木盆地北缘大煤沟地区,完钻井深为760.2 m,至古元古界。自ZK14-1钻井436 m处开始取样,在436~733 m层段约10 m处取一个样品,共取样28件,根据岩性特征个别层段取样密集或稀疏。样品岩性主要为含砾砂岩、泥质粉砂岩、泥岩、炭质泥岩、页岩和煤等固结沉积物(图2)。

样品研磨等前处理、样品消解及分析测试均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。利用酸法消解将研磨至200目以下矿物置于聚四氟乙烯溶样弹中,加入0.5 mL浓硝酸与1.0 mL浓氢氟酸,溶样弹经钢套密封后放入195 ℃烘箱加热3天,确保消解完全。将盛放消解液的溶样弹在电热板上蒸至湿盐状,加入1 mL内标Rh,再加入5 mL 15 wt%硝酸,重新密闭溶样弹,放入195 ℃烘箱12 h。将约6 mL消解液转移至离心管中,取部分稀释液(稀释因子500倍)以溶液雾化形式送入Agilent 7900 ICP-MS测定微量元素含量。

系	统	组	代号	柱状图	岩性描述	样品编号
第四系			Q		第四系沉积物	
侏罗系	上统	采石岭组	J_3c		紫红-浅绿色泥质粉砂岩	ZK14-1-10
					紫红-浅绿色泥质粉砂岩	ZK14-1-15
					紫红-浅绿色泥质粉砂岩	ZK14-1-22
					紫红色泥质粉砂岩	ZK14-1-29
					灰白色含砾粗砂岩	ZK14-1-31
					紫红-浅灰绿色泥质粉砂岩	ZK14-1-35
					灰绿色粉砂质泥岩	ZK14-1-42
					深灰色页岩	ZK14-1-52
					黑色块状的半亮型煤	ZK14-1-63
					灰白色中粒砂岩	ZK14-1-70
					黑褐色块状的半亮型煤	ZK14-1-75
					浅灰色粉砂岩	ZK14-1-80
					浅灰色粉砂岩	ZK14-1-82
					浅灰色粉砂岩	ZK14-1-86
					浅灰色泥质粉砂岩	ZK14-1-97
					深灰色泥岩	ZK14-1-104
					深灰色泥岩	ZK14-1-113
					深灰色泥岩	ZK14-1-119
					浅灰色泥质粉砂岩	ZK14-1-127
					浅灰绿色细砾岩	ZK14-1-133
					棕红色泥岩	ZK14-1-141
					浅灰色泥质粉砂岩	ZK14-1-146
					浅灰色含砾粗砂岩	ZK14-1-154
	中统	石门沟组	J_2s		浅灰色粉砂岩	ZK14-1-162
		大煤沟组	J_2d		浅灰色泥质粉砂岩	ZK14-1-174
					黑色粉末状的半亮型煤	ZK14-1-177
					灰黑色炭质泥岩	ZK14-1-181
					浅灰色细粒砂岩	ZK14-1-187
古元古界			Pt_1		暗绿色-浅肉红色花岗片麻岩	

图2　大煤沟地区侏罗系地层柱状图及采样位置图

Fig. 2　Jurassic stratigraphic histogram and sampling location map in Dameigou area

3　测试结果

3.1　微量元素地球化学特征

本次选取28件钻井岩芯样品进行微量元素地

球化学测试，结果见附表1。每个沉积地层中的化学成分对其沉积环境和物源有一定的反映，可作为判别物源及其古环境的重要依据[50]。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上显示（图3a），岩芯样品富集Rb、Th、U和Pb，较富集Ba和Ta，没有表现出明显的亏损。大煤沟岩芯样品中稀有元素含量具体表现为Li（11.5～71.6 μg/g）平均含量为44.6 μg/g、Rb（2.7～181.4 μg/g）平均含量为142.3 μg/g、Nb（2.8～25.3 μg/g）平均含量为18.5 μg/g、Be（0.5～4.7 μg/g）平均含量为3.1 μg/g、Ta（0.2～1.9 μg/g）平均含量为1.3 μg/g、Cs（0.2～23.8 μg/g）平均含量为14.2 μg/g、Sn（0.5～5.2 μg/g）平均含量为3.9 μg/g（附表2）。以上地壳稀有金属含量为参照，其中Rb、Cs、Be、Sn元素显著富集，而Li、Nb、Ta等元素富集不明显[51]。

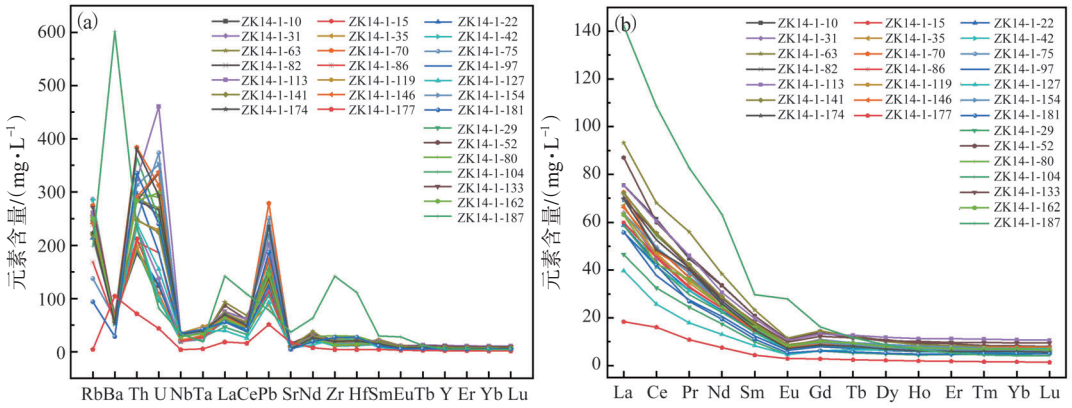


图3 大煤沟地区钻井岩芯样品微量元素蛛网图（a）和原始地幔标准化稀土元素配分模式图（b）[52]

Fig. 3 The race element spider web diagram（a）and normalized rare earth element allocation pattern of the original mantle（b）of drilled core samples in Dameigou area[52]

3.2 稀土元素地球化学特征

稀土元素作为揭示矿床物源、成矿成因的一种示踪剂，常利用元素Ce、Eu的异常值δCe、δEu来反映体系内的地球化学特征，是判别物质来源的重要参数[53]。在δCe-δEu图解中（图4a），δCe值多数大于1，而δEu多数小于1，δCe值介于0.89～1.14，平均值为0.99，δEu值介于0.34～0.64，平均值为0.41，呈负异常，略显亏损（附表1）。据$(La/Yb)_N$-$(La/Sm)_N$图解中投点情况看（图4b），二者相关性不强；$(La/Yb)_N$值为10.95，分馏显著，指示岩石矿物中轻稀土元素相对于重稀土元素显著富集，表明花岗质熔融体高度分异演化，轻稀土元素在残余熔体中富集。在原始地幔标准化稀土元素配分图中（图3b），Eu负异常明显，仅在733 m段（ZK14-1-187）显示正异常，曲线总体呈右倾型平滑曲线，暗示稀土元素可能来源于源区花岗岩高分异演化。

3.3 元素丰度及其变化

ZK14-1钻井岩芯的微量元素变化范围及平均丰度列于（附表2）。可以看出：在543～568 m段（ZK14-52，63，70）Li、Be、Sc、Cu、Zn、Rb、Cs、Pb、Th、U各微量元

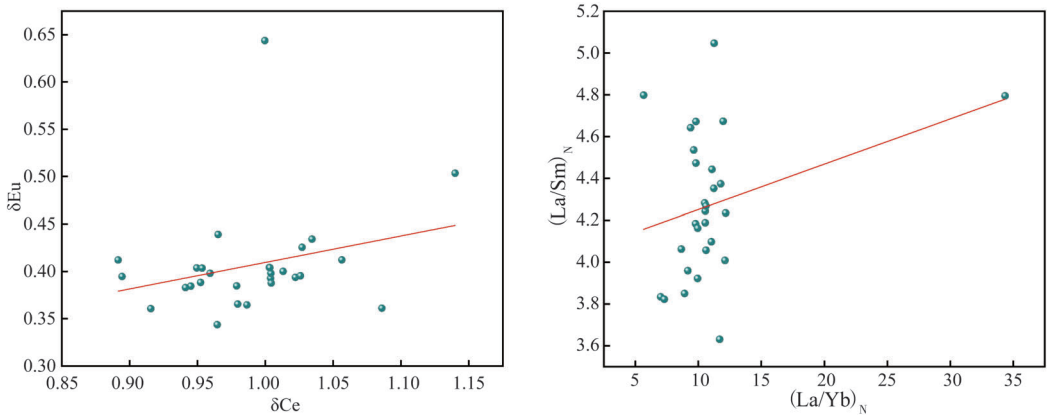


图4 大煤沟地区δCe-δEu和$(La/Yb)_N$-$(La/Sm)_N$相关性图解

Fig. 4 Correlation diagram of δCe-δEu and $(La/Yb)_N$-$(La/Sm)_N$ in Dameigou area

素丰度上部与下部地层存在显著的差异,皆高于上部地层的元素丰度,而 Sr 元素含量则低于上部地层,该段沉积物具有不同于上部地层的地球化学特征。相对于中国大陆沉积物微量元素丰度,该孔沉积物微量元素丰度具有较高的平均值,如 Li(44.6 μg/g)、Ga(25.5 μg/g)、Rb(142.3 μg/g)、Sr(214.6 μg/g)、Cs(14.2 μg/g)、Th(22.3 μg/g)和 U(4.7 μg/g),略高于中国大陆沉积物的有 Sc(15.4 μg/g)、Y(31.7 μg/g)和 Nb(18.5 μg/g),这表明在风化淋滤过程中,塔塔楞岩体中丰富的 Rb 等金属离子被大气降水等冲刷、淋滤出来[54,38],形成的含矿溶液通过地表径流或地下水迁移,最终在煤系地层富集,且煤系地层岩性主要包括泥岩、炭质泥岩和煤,这些岩层都极具吸附性,能够高效吸附溶液中的金属阳离子,形成稳定的金属-有机络合物,使其稳定地赋存在该地层中。

3.4　元素比值变化

微量元素总体上抗风化能力较强,尤其是一些元素比值一般不受风化过程的影响,能够很好地记录源区岩石的地球化学特征[55]。ZK14-1 钻孔微量元素比值随深度变化特征如图 5 所示。可以看出,岩芯中微量元素 Zr/Hf、La/Sm、La/Lu、Zr/Sm、La/Sc 比值在纵向剖面上存在显著变化,Th/Sc、Nb/Ta 在 430 ~ 700 m 段变化并不明显,但在 700 m 处出现明显变化。总体上看,微量元素发生的变化主要在 430 ~ 520 m、520 ~ 550 m、550 ~ 680 m、680 ~ 700 m、700 m 以上,说明在该段沉积环境发生了明显的变化。

Zr/Hf平均值为 35.38,在 730 m段甚至达到 46.23,而塔塔楞岩体花岗岩 Zr/Hf 比值为 4.18 ~ 7.7,表现出高分异演化特征,而研究区沉积层 Zr/Hf 平均值表现为中等分异,间接表明该区存在源区含矿物质较大量汇入;Th/Sc > 1 且 La/Sc 平均值为 3.00,大于 2.5,表明物质来源主要是大陆壳幔长英质岩石;在 430 ~ 730 m Nb/Ta 比值为 12.16 ~ 14.08,说明在这段壳幔分异过程中 Ta 相对富集于地壳中,但在 730 m 处发生突变,可能是沉积物所处环境发生物理化学变化,致使 Ta 集中富集;La/Sm 平均值为 6.61,比值偏高,可能是沉积环境发生变化时随之携带富 La 组分;La/Lu 平均值为 102.97,在 730 m 段高达 316.54,表明稀土元素分馏程度高;Zr/Sm 平均值为 33.87,由于比值较高,源区为亏损地幔。

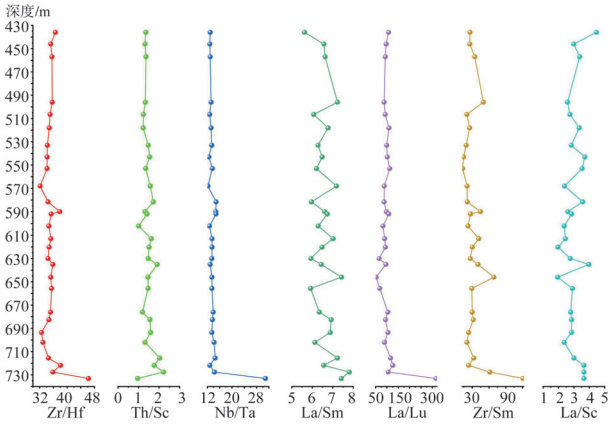


图 5　钻井岩芯中微量元素比值随钻井深度变化曲线

Fig. 5　Ratio of trace elements in drilling core with drilling depth

4　讨　论

4.1　沉积环境

沉积环境对煤系地层中矿物质和微量元素的迁移富集影响较大,利用 V/Cr、Ni/Co 比值来判断成岩过程中古氧化还原环境(附表 2)。V/Cr < 2 表示氧化环境,V/Cr > 4.25 为还原环境,介于 2 ~ 4.25 之间时指示为贫氧环境;钻井岩芯 V/Cr 比值介于 0.80 ~ 4.23 之间,平均值为 1.59,表明在沉积成岩过程中处于氧化-贫氧环境;Ni/Co < 5 表示为氧化环境,Ni/Co > 7 为还原环境,在 5 ~ 7 时为贫氧环境[56]。Ni/Co 比值介于 0.54 ~ 5.30 之间,平均值为 2.83,同样验证了当时处于氧化-贫氧环境。但由于所研究地层为煤系地层,需要考虑泥质、煤质体系中有机质的影响。因此,根据煤系地层中 V/(V + Ni)比值介于 0.67 ~ 0.96 之间,平均值为 0.78,可以判断沉积环境为厌氧环境。另外,U/Th 比值在煤系地层中极其敏感,是沉积地层缺氧环境中的良好指标,研究区所采样品 U/Th 比值介于 0.09 ~ 0.37 之间,平均值为 0.20,表明沉积环境是氧化环境。煤系中若富含有机质,U 元素则被异常富集,含量会升高,然而研究区显示 U/Th 比值极低,表明该区有机质并不丰富,对沉积环境的影响并不大。因此,认为氧化还原指标 V/Cr、Ni/Co、V/(V + Ni)比值的结果是可靠的。

4.2　元素相关性分析

在沉积过程中,元素丰度随着沉积物组分的改变而变化,使得化学性质相同或相异的元素发生分散或富集,形成差异化的分异规律[57]。对 ZK14-1 钻

井岩芯中微量元素做了相关性分析，结果如图6所示。可以看出，Li与Sn、Cs、Th之间呈现正相关，相关系数依次为0.9、0.8、0.8，表明这些元素在迁移富集和沉积过程中所表现的地球化学行为相似。Zr、Hf、Sr元素与REE之间呈现显著的正相关，这些元素在表生作用下地球化学性质相对稳定，主要反映的是陆源碎屑源区的地球化学特征。Sc、V、Co、Ni、Cu、Zn这些元素主要赋存在镁铁质岩浆岩或其他矿物中，且根据Th/Sc和La/Sc比值判断，该区沉积物源可能来自大陆壳幔长英质岩石，所以这些元素呈现的相关性较弱，它们一致的相关性也反映了沉积物源区的岩石特性。Rb与Cs、Sn、Li、Be、Sc、Cr这些元素相关性相对较强，相关性系数为0.6，这也符合Rb不单独成矿，赋存在其他矿床类型中的特征。Sr与多数微量元素都呈负相关，应是Sr主要来自海洋生物沉积的反映，Sr主要取代Ca而赋存在钙质沉积物中[55]。在海洋沉积物中，生物组分与陆源碎屑组分呈此消彼长的关系。

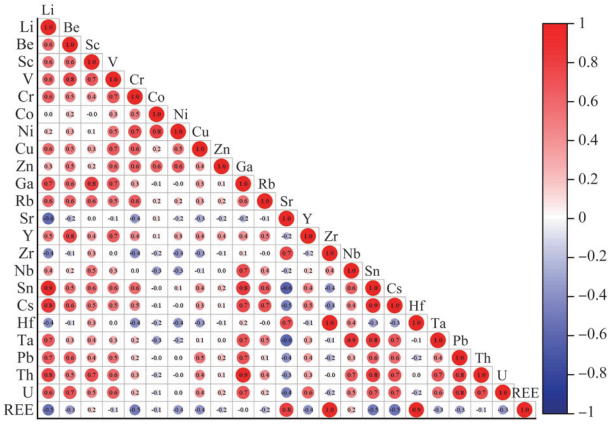


图6 钻井岩芯中微量元素方差矩阵

Fig. 6 Variance matrix of trace elements in drilling core samples

钻孔岩芯样品表现出明显的Eu负异常（δEu = 0.34 ~ 0.64，均值为0.41），仅在730 m段表现为正异常，但基本为Ce负异常（δCe = 0.89 ~ 1.14，均值为0.99）（附表2），同时δEu与∑REE之间相关性较好，而δCe与∑REE之间基本无相关性（图7a、b）。

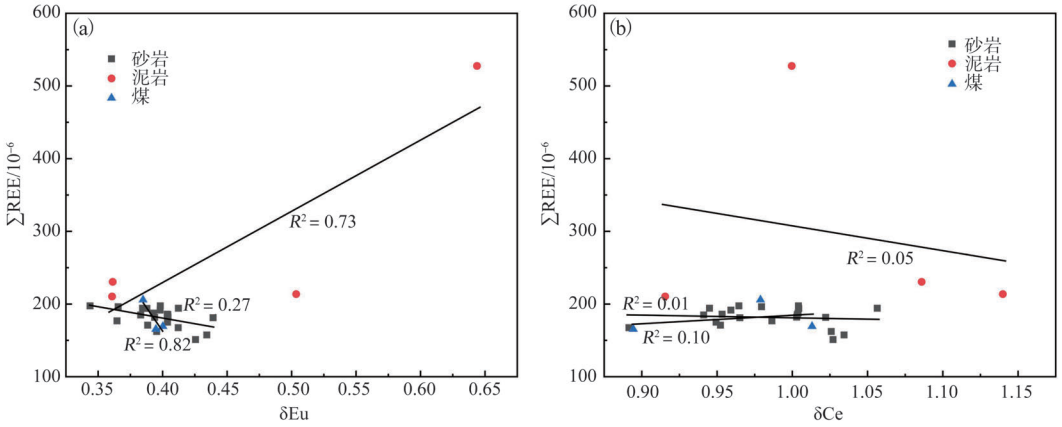


图7 大煤沟地区岩芯样品各类型指标之间的相关性

Fig. 7 Correlation between various types of indexes of core samples in the large coal ditch area

4.3 铷元素富集规律探讨

Rb作为不相容元素，在岩浆分异演化过程中会进入熔体，富集在残余岩浆中[58,59]。因此，可以通过分析岩体各阶段的演化程度来讨论Rb的富集规律。而本文通过对柴北缘大煤沟地区的沉积地层进行研究，发现钻井岩芯沉积地层富Rb，相对富集Li、Ga、Sr、Cs、Th、U，贫Zr、Ta，指示可能是这些富集元素吸附在煤层、砂岩及泥岩中。Li、Rb、Cs等元素的赋存与黏土矿物的关系极其密切，Rb、Cs的载体主要为伊利石等黏土矿物[16]。本研究所采集岩芯样品的Rb含量在2.66 ~ 181.36 μg/g之间，均值为142.27 μg/g，在721 ~ 727 m层段Rb元素丰度值较低（2.66 ~ 59.66 μg/g），但相比于整个柴达木盆地（Rb丰度值为95.73 μg/g）来说，该地区Rb含量相对较高[16]。根据赵春涛等研究发现，塔塔楞岩体主要由早期的中细粒黑云母二长花岗岩组成，呈不规则状出露于柴达木盆地北缘古生代造山带，出露范围很广，侵位于古生代-中生代地层中[38]。塔塔楞岩体Rb元素丰度值（22.2 ~ 355.9 μg/g，平均值为199.2 μg/g）远高于整个柴达木盆地，这表明塔塔楞岩体经历高分异演化过程，最终形成复合型岩体，在分异演化过程中Rb等元素迁移富集，这也是早期中细粒二长花岗岩Rb含量很低，而斑状和似斑状花岗岩中Rb含量很高的

原因[54,38]。

利用富集系数CC评价煤系地层中微量元素含量,对其中8件样品进行分析,以世界煤和世界沉积岩为背景值(表1)。CC可划分为六类:< 0.5(亏损)、0.5 ~ 2(正常)、> 2 ~ 5(轻度富集)、> 5 ~ 10(富集)、> 10 ~ 100(高度富集)和> 100(异常富集)[36]。从图8可以看出,样品ZK14-1-63和ZK14-1-75中微量元素普遍富集,其中Rb、Cs高度富集,富集系数为Rb(9.92、6.24)、Cs(10.24、10.95)。ZK14-1-177中仅Sr(3.29)轻度富集,Be、Rb、Cs和Ga元素明显亏损。以上三件煤样中ZK14-1-63 & 75 Rb元素明显富集,但在ZK14-1-177中却出现明显亏损。推测深部煤系地层温压发生变化,在这个过程中煤系地层会释放大量的有机酸,使深部流体变为酸性,溶解和淋滤在晶格中半径离子较大的Rb、Cs等,原本附着在载体矿物云母和黏土矿物上的Rb、Cs变得不稳定,最后Rb等从固相进入液相流体中被迁出。从煤层顶底板微量元素富集系数的分布来看,Nb和Ga轻度富集,Rb、Cs等元素既不富集也不亏损,仅有Sr出现亏损。

表1　钻井煤样和岩样中微量元素含量

Table 1　Trace element content in coal and rock samples　　μg/g

编号	岩性	Li	Be	Nb	Ta	Zr	Sr	Hf	Rb	Cs	Ga
ZK14-1-52	页岩	61.92	3.88	15.33	1.23	134.27	319.83	3.93	157.04	15.16	27.20
ZK14-1-63	煤	47.22	3.35	13.46	0.99	133.85	195.90	3.92	138.83	10.24	25.67
ZK14-1-70	中粒砂岩	71.61	4.60	15.40	1.27	145.08	187.45	4.52	174.41	23.75	34.91
ZK14-1-75	煤	33.05	4.67	13.85	0.93	156.26	206.93	4.54	87.38	10.95	23.75
ZK14-1-80	粉砂岩	58.27	3.14	25.33	1.72	338.09	121.37	8.93	141.86	14.86	27.87
ZK14-1-174	泥质粉砂岩	50.66	2.70	23.62	1.63	218.11	123.69	6.31	142.43	18.62	32.62
ZK14-1-177	煤	11.54	0.51	2.82	0.22	45.70	361.94	1.20	2.66	0.22	2.75
ZK14-1-181	炭质泥岩	43.27	1.71	24.80	1.74	301.56	96.48	8.42	59.66	6.71	31.15
中国煤	煤	31.80	2.11	9.44	0.62	89.50	140.00	3.71	9.25	1.13	6.55
世界煤	煤	12.00	1.60	3.70	0.28	36.00	110.00	1.20	14.00	1.00	5.80
沉积岩	\	33.00	1.90	7.60	1.00	170.00	270.00	3.90	94.00	7.70	12.00

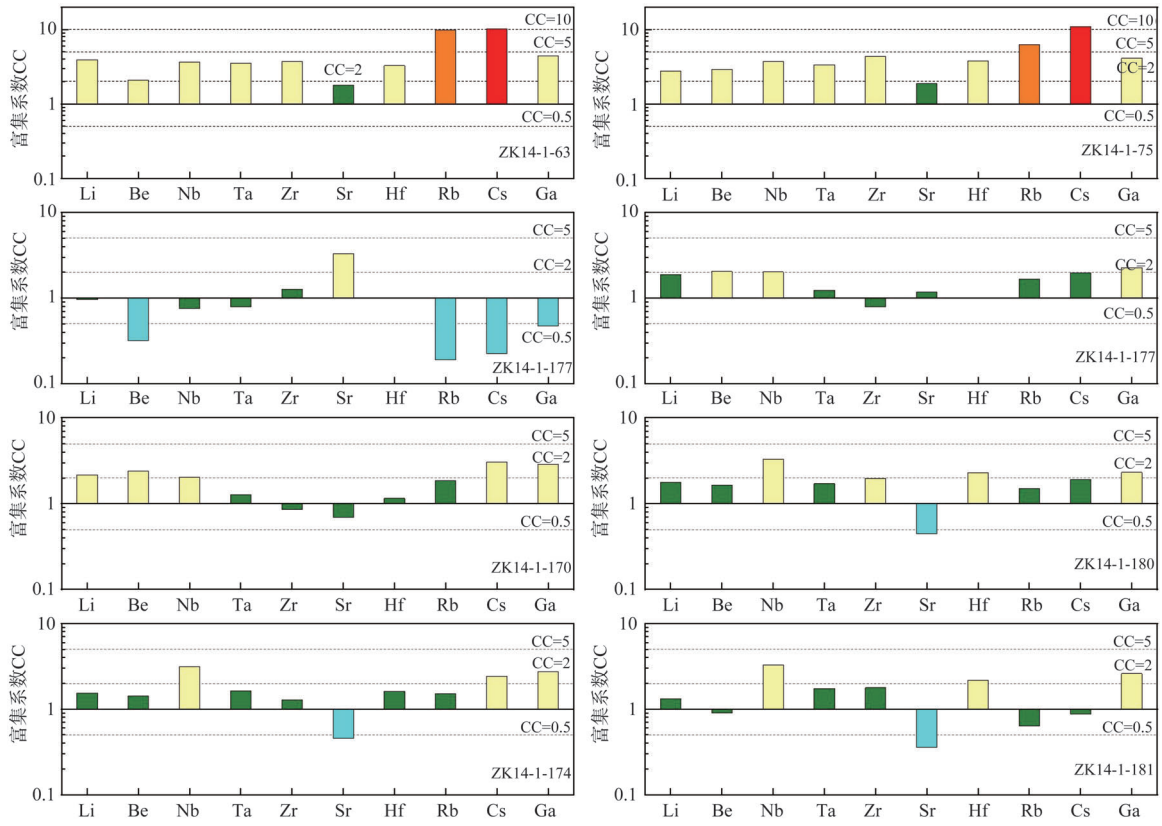


图8　柴北缘中段大煤沟地区煤系地层中微量元素富集系数

Fig. 8　Enrichment coefficient of trace elements in coal-bearing strata in the Dameigou area

煤系地层中往往是多种关键金属元素共生富集，煤层的顶底板或者其他层段的泥岩和炭质泥岩等都富含关键金属元素。如图9所示，姬晓燕等对宁东煤田任家庄井田煤系研究，发现Zr元素富集，Li和Sr元素轻度富集[60,61]；丁允龙等对织纳煤田煤系地层中微量元素研究发现，Zr元素高度富集，Sr富集，Li轻度富集[62]；衣姝对柴北缘大煤沟矿区煤层进行研究，发现Sr、Tl和Mn富集，其他元素无明显富集行为[63]。本文所研究区域Cs元素高度富集，Rb元素富集，Li、Be、Nb、Ta、Zr、Hf和Ga元素轻度富集。综合诸多学者对煤系地层的研究，可以得出煤系地层中富含关键战略金属元素，且大多数共生的关键元素在煤产物中赋存状态相似，大多数关键金属存在于莫来石和非晶态的玻璃体中，这也极大地降低了开发成本，保护了生态环境。

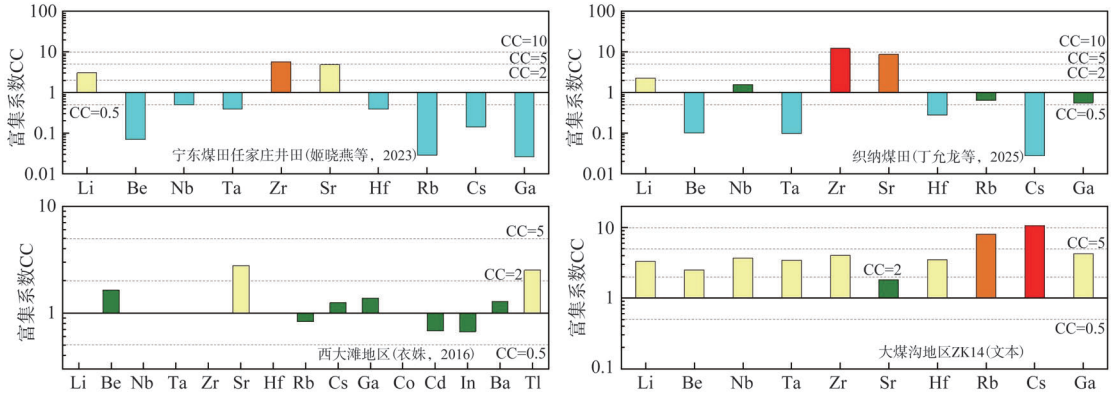


图9 煤田煤系地层中微量元素富集系数[61-63]

Fig. 9 Enrichment coefficient of trace elements in coal-based strata in coalfield[61-63]

根据微量元素随钻井深度纵向变化曲线(图10)，在白垩系、上侏罗统采石岭组、中侏罗统石门沟组和大煤沟组上段Rb元素含量(142.27 μg/g)均高于柴北缘地区(95.73 μg/g)。在436～550 m层段各元素丰度值变化较小，但在721～724 m层段各元素丰度值发生显著突变，急剧降低。推测深部煤系地层温压发生变化，在这个过程中煤系地层会释放大量的有机酸，使深部流体变为酸性，溶解和淋滤在晶格中半径离子较大的Rb、Cs等，原本附着在载体矿物云母和黏土矿物上的Rb、Cs变得不稳定，最后Rb等从固相进入液相流体中被迁出。由于该层段岩性表现为煤层，孔隙水不断淋滤，含矿溶液随着孔隙间水迁移至下层段封闭性更好的泥岩层，这也是下层段稀有金属元素含量回升的缘故。

据焦龙进等对沉积型铷铯等矿床的研究，其成矿主要集中在构造活动多发期及板块活动形成的盆地，这些盆地就是极佳的容矿场所。构造活动为深部热液上涌提供了通道，富含铷铯的热液受到温压作用而上涌，同时对深部富矿物进行淋滤，最后涌出地表或汇集到地下暗河中。青藏高原极度的干旱气

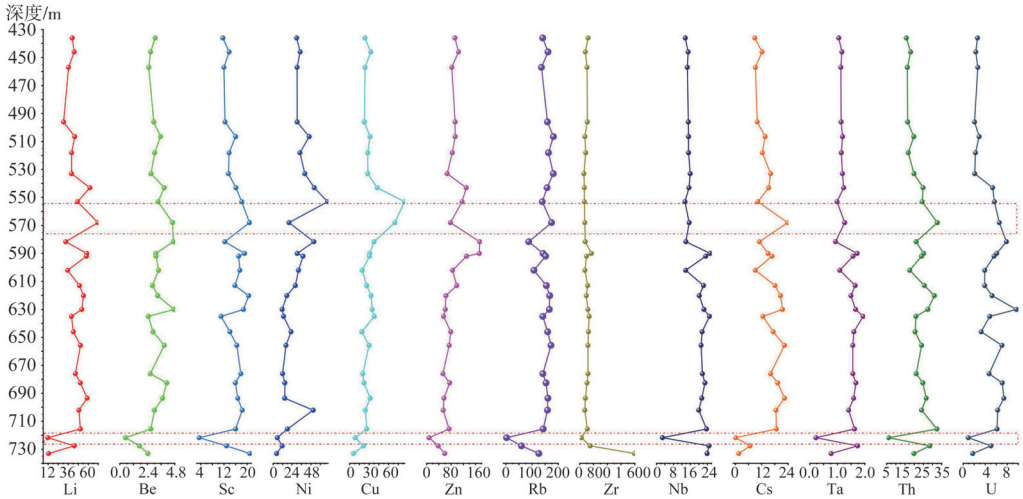


图10 钻井岩芯微量元素随钻井深度变化曲线

Fig. 10 Variation curve of trace elements in drilling core with drilling depth

候,使得蒸发作用加强,盆地内液体蒸发浓缩,最后富集在沉积地层。柴达木盆地地处青藏高原东北部,经历了多期构造改造,中新生代盆地整体抬升,接受风化剥蚀,侏罗系地层不整合于花岗岩体之上[49]。这些盆地形成年代较早,封闭性好,其下为较厚的沉积储层,为铷铯等稀有金属矿床的形成提供了良好的储矿条件。在侏罗系时期该地区整体由原先受拉张应力转化为挤压应力,盆地也因此演化为断-坳复合盆地,形成了以大煤沟地区为沉积中心,向四周超覆沉积的特征[46,64,65]。柴北缘大煤沟地区地层褶皱发育,伴有规模较大的逆冲推覆构造。该地区 Rb 含量远高于整个盆地的 Rb 元素丰度,且具有封闭性较好的沉积储层,地处柴北缘的塔塔楞岩体作为富含 Rb 等稀有金属元素的复合型岩体为研究区提供了充足的物质补给。研究发现,研究区煤系地层中富含 Rb 等稀有金属元素,这也为后期对煤系地层的研究提供了一些研究基础。

4.4　物源分析

塔塔楞岩体地处柴达木盆地北缘,主要岩性为中细粒二长花岗岩、斑状花岗岩和似斑状花岗岩,高分异演化特征显著[65]。

沉积岩一般保留了源岩的特征,δEu 可有效指示沉积母岩。中酸性岩浆岩风化形成的沉积岩常伴有明显的 Eu 负异常,而基性火成岩风化形成的沉积岩则没有显示或者显示微弱的 Eu 负异常[36,66]。据原始地幔标准值稀土元素配分图,图像呈现显著的右倾型,且显示 Eu 负异常(图 3),表明煤系地层物质主要受控于陆源碎屑补给,可能来源于长英质花岗岩的风化碎屑物质。赵春涛等研究表明,塔塔楞岩体的稀土配分图也呈现明显 Eu 负异常的右倾型配分模式,说明前者与塔塔楞岩体可能存在源汇补给关系(表2)[38]。另外,衣姝对西大滩矿区煤中矿物质的来源进行了研究,发现该区煤灰分均值为 23.9%,判断煤中的矿物质主要来自物源区的补给,并非泥炭植物体本身,在研究区周缘发现 Rb 等含量较高的岩体为塔塔楞岩体,这也为该区确定物源提供一种可能,但不能由此确定研究区的沉积源区[62]。

在风化、搬运、沉积过程中,Zr、Nb、Y、Th、Sc 等元素性质稳定,受影响较小,经常被用来反映沉积母岩的性质[67]。Nb/Y 和∑REE 元素比值在源岩和碎屑沉积层中基本相同,可反映沉积母岩的化学特征,是指示沉积地层源区的可靠参数[68]。

表2　塔塔楞岩体元素分析数据

Table 2　Elemental analysis data of Tatareng pluton　　$\times 10^{-6}$

样品号	TiO_2/%	Li	Be	B	Rb	Sr	Zr	Y	Nb	Cs	Ba
TTLYT-1	0.17	59.731	4.864	7.282	324.559	59.387	121.086	62.159	9.393	13.788	286.357
TTLYT-2	0.54	43.321	1.955	6.945	168.988	174.317	328.466	38.129	16.817	9.752	1646.425
TTLYT-3	0.18	14.740	3.374	2.490	355.884	65.607	105.955	36.317	10.127	17.169	438.474
TTLYT-6	0.02	30.239	4.659	0.801	25.569	197.450	7.990	5.444	0.774	1.488	452.502
TTLYT-7	0.29	7.405	2.892	3.385	22.204	28.596	147.608	18.897	21.252	1.448	63.365
TTLYT-8	0.19	77.908	6.430	89.839	351.803	69.483	135.959	37.806	10.818	35.211	333.324
TTLYT-15	0.04	80.920	6.225	11.657	305.240	107.740	96.331	17.361	16.000	20.785	339.855
TTLYT-14-1	/	27.095	0.364	1.856	39.252	21.588	3.450	/	/	1.081	27.813
TTLYT-14-2	0.16	8.950	4.559	191.323	29.329	6.851	94.278	/	/	1.486	10.146

数据来源(赵春涛等,2025)[38]

观察 Nb/Y-Zr/TiO_2图解(图 11),发现塔塔楞岩体样品大多分布于中酸性花岗闪长岩区域。根据∑REE-La/Yb 图解(图 12)发现研究区钻孔样品主要分布在酸性花岗岩范围内,从塔塔楞岩体的岩性特征(图 11)与煤系地层钻孔样品的岩性特征(图 12)发现,研究区沉积时受到了来自塔塔楞岩体的物质补给。

结合前文及诸多学者研究可知,沉积源区经风化剥蚀的陆源碎屑物质为研究区煤系地层中微量元素富集提供了重要的物质来源,这些含矿物质随地表水或地下径流迁移,经淋滤作用,溶解、浸出的稀有元素在迁移过程中不断搬运,在水动力条件减弱、

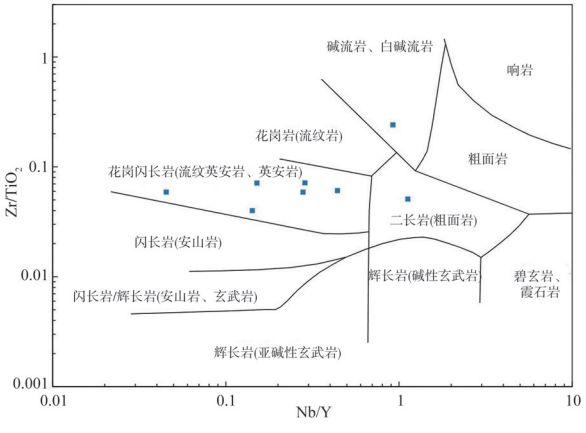


图11　塔塔楞岩体 Nb/Y-Zr/TiO_2判别图解[69]

Fig. 11　Diagram of Nb/Y-Zr/TiO_2 of the Tatareng pluton[69]

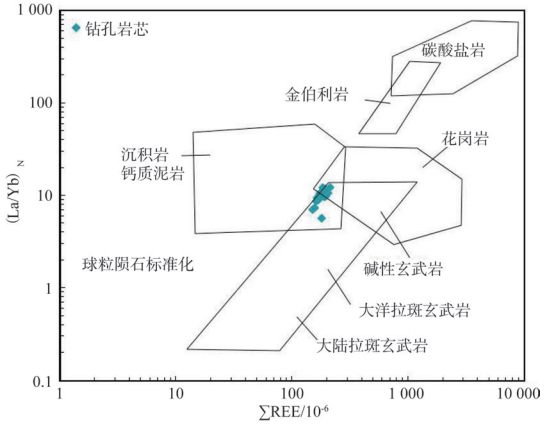


图12 大煤沟地区钻孔岩芯∑REE-La/Yb判别图解[70]

Fig. 12 REE-La/Yb discriminant diagram of bored core in Dameigou area[70]

容矿条件极佳的场所沉淀,最后这些稀有金属元素在泥炭沼泽中与成煤物质同时沉淀、聚集成矿。综上,这些煤系地层中稀有金属元素富集形成了一个完整的表生成矿系统:富集岩体(塔塔楞岩体)→风化淋滤→流体迁移→煤系地层(吸附)→沉淀聚集(成矿)。

5 结 论

(1) 大煤沟沉积地层具有高Rb、Li、Cs,贫Ta的赋存特征,尤其Rb元素丰度值远高于中国大陆沉积物。

(2) 大煤沟煤系地层的成岩过程形成于氧化-贫氧-厌氧环境,塔塔楞岩体富Rb等元素,在风化、搬运、沉积过程中,含矿溶液被地表水或地下径流携带迁移至研究区,在煤系地层稀有金属元素沉淀,聚集成矿。形成了一个完整的表生成矿系统:富集岩体(塔塔楞岩体)→风化淋滤→流体迁移→煤系地层(吸附)→沉淀聚集(成矿)。

(3) 元素相关性分析显示,Rb与Cs、Li、Be、Cr等元素相关性较强,也符合Rb一般赋存于Cs等类型矿床中,不单独成矿的特征;Sc、V、Co、Ni、Cu、Zn元素相关性较弱,反映了沉积物源区的岩石特性。

参考文献

[1] 缪煜清,欧阳瑞镯,李钰皓. 铷元素科学研究与应用进展[J]. 有色金属材料与工程,2023,44(2):11-15.

[2] OUYANG S H, ZHENG K, HUANG Q L, *et al*. Synthesis and characterization of rubidium-containing bioactive glass nanoparticles[J]. Materials Letters, 2020, 273: 127920.

[3] 高野,王迪. 辽宁某铷铯矿铷的提取选矿工艺研究[J]. 有色矿冶,2025,41(1):21-23.

[4] 李峥岩,侯殿保,常宏,等. 中国铷铯资源类型、分布、矿床成因、富集规律及分离提取技术研究进展[J]. 中国矿业,2025,34(2):265-283.

[5] 王云生,郭娟,刘喜方,等. 中国铷铯资源、提取技术与开发利用研究[J]. 地球学报,2024,45(5):823-829.

[6] 张所续,罗晓玲. 美国关键矿产政策内涵的演变与启示[J]. 中国矿业,2020,29(12):15-21.

[7] 鞠建华,韩见,冯聪. 我国矿产资源综合利用现状评估与发展路径[J]. 中国矿业,2024,33(6):14-25.

[8] 丹美涵,张厚和,车超,等. 大能源视角下中国能源安全形势及中央企业作用研究[J]. 中国矿业,2024,33(2):1-9.

[9] 郭娟,崔荣国,周起忠,等. 2023年中国矿产资源形势回顾与展望[J]. 中国矿业,2024,33(1):12-19.

[10] 吴初国,吴琪,仇巍巍,等. 美国锂矿产业发展及其对我国的影响[J]. 中国矿业,2024,33(08):1-7.

[11] XUE F, TAN H B, ZHANG X Y, *et al*. Contrasting sources and enrichment mechanisms in lithium-rich salt lakes: A Li-HO isotopic and geochemical study from northern Tibetan Plateau[J]. Geoscience Frontiers, 2024, 15(2): 101768.

[12] 周潇,赵元艺,陈文西. 青藏高原盐湖铷铯资源现状、富集规律与提取技术[J]. 地质论评,2024,70(2):705-716.

[13] 自然资源部. 2022年度全国矿产资源储量统计数据发布[J]. 黄金科学技术,2023,31(3):452.

[14] 李建森,李廷伟,马云麒,等. 柴达木盆地卤水型Li、Rb关键金属矿产元素分布特征及富集机制[J]. 中国科学:地球科学,2022,52(3):474-485.

[15] 李庆宽,王建萍,樊启顺,等. 西藏盐湖沉积物:一种潜在的铷、铯资源[J]. 地质学报,2023,97(10):3410-3420.

[16] 潘彤,陈建洲,丁成旺,等. 柴达木盆地盐湖黏土中锂、铷、铯超常富集及其开发潜力[J]. 中国地质,2023,50(6):1925-1927.

[17] 赖杨,邓伟. 川西九龙打枪沟锂铍矿石特征及其铷元素赋存状态和分布规律研究[J]. 矿产综合利用,2022,(5):185-192.

[18] 朱镇源,孔凡翠,王建萍,等. 可可西里布喀达坂峰热泉中锂铷铯分布规律及其富集机制[J]. 岩石学报,2025,41(3):983-994.

[19] 张军,陶耐,齐尚星,等. 皖南伏岭岩体岩石成因及对铷富集的指示[J]. 物探与化探,2024,48(3):584-596.

[20] 顾连兴,吴昌志,张遵忠,等. 东疆白石头泉含黄玉天河石花岗岩体的地球化学:分带和岩浆演化[J]. 高校地质学报,2007,(2):207-223.

[21] GU L X, ZHANG Z Z, WU C Z, *et al*. A topaz-and amazonite-bearing leucogranite pluton in eastern Xinjiang, NW China and its zoning[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 42(5): 885-902.

[22] HAN J S, CHEN H Y, HOLLINGS P, *et al*. Efficient enrichment of Rb during the magmatic-hydrothermal transition in a highly evolved granitic system: Implications from mica chemistry of the Tiantangshan Rb-Sn-W deposit[J]. Chemical Geology, 2021, 560: 120020.

[23] SYRITSO L F, IVANOVA A A, BADANINA E V, *et al*. Amazonite Li-F granites with REE-Nb-Zr-Th-U specialization: Geochemistry, mineralogy, and isotope geochronology of the Turga Massif, Eastern Transbaikalia[J]. Petrology, 2021, 29: 54-76.

[24] 吴昌志,贾力,雷如雄,等. 中亚造山带天河石花岗岩及相关铷矿床的主要特征与研究进展[J]. 岩石学报,2021,37(9):2604-2628.

[25] 陈祉卫,袁超,林正帆,等. 新疆阿尔泰将军山天河石花岗岩的成因和铷富集机制[J]. 大地构造与成矿学,2024,48(6):1394-1420.

[26] WU S B, LEI R X, BRZOZOWSKI M J, *et al*. Rubidium (Rb) enrichment processes in a highly evolved granitic system: In-

sights from the petrology and geochemistry of the Guobaoshan Rb deposit in eastern Tianshan, NW China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2025, 137(3/4): 1456-1474.
[27] ZHAO C L, LIU B J, XIAO L, *et al*. Significant enrichment of Ga, Rb, Cs, REEs and Y in the Jurassic No. 6 coal in the IQE Coalfield, northern Qaidam Basin, China—A hidden gem[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 83: 1-13.
[28] IKEH T J, SUN B L, LIU C, *et al*. Modes of occurrence and enrichment of trace elements in coal from the Anjialing Mine, Pingshuo Mining District, Ningwu coalfield, Shanxi Province, China[J]. Minerals, 2022, 12(9): 1082.
[29] WANG W C, ZHENG L G, WU Z W, *et al*. Geochemical characteristics of rare-metal, rare-dispersed, and rare-earth elements and depositional environments in the shanxi formation coal, huainan coalfield, Anhui, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(3): 1887.
[30] FU J N, CHEN T J, CUI F. Zonal geochemistry and elasticity characteristics of gallium-and lithium-rich no. 6 coalbed in the Haerwusu Mine, North China[J]. Minerals, 2024, 14(4): 404.
[31] 曹默然. 滇东黔西晚二叠世含煤地层中关键金属元素的分布赋存特征[D]. 徐州：中国矿业大学, 2025.
[32] 杨天洋, 沈玉林, 金军, 等. 黔西上二叠统煤系关键金属富集层时空分布及地质控制因素[J]. 地质学报, 2024, 98(8): 2365-2378.
[33] 郑雪, 李景贤, 周鑫, 等. 鲁西地区石炭纪—二叠纪煤系关键金属富集特征及其控制因素[J]. 地质学报, 2024, 98(8): 2351-2364.
[34] 陈文韬, 刘建勋, 梁太涛, 等. 宁汶煤田保安煤矿3号煤层煤中关键金属富集特征与成因机制[J]. 中国矿业, 2025, 34(7): 211-220.
[35] 魏强, 代世峰. 中国煤型锗矿床中的关键金属和有害元素：赋存特征与富集成因[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 296-303.
[36] DAI S F, GRAHAM I T, WARD C R. A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal[J]. International journal of coal geology, 2016, 159: 82-95.
[37] 代世峰, 赵蕾, 魏强, 等. 中国煤系中关键金属资源：富集类型与分布[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3715-3729.
[38] 赵春涛, 王建萍, 李斌凯, 等. 柴北缘大柴旦电气石花岗岩成因及富硼机制研究[J]. 岩石学报, 2025, 41(2): 711-736.
[39] 黄献好, 孙玉琦, 王伟超, 等. 柴北缘西大滩地区下—中侏罗统层序—古地理及聚煤特征[J]. 沉积学报, 2020, 38(2): 266-283.
[40] 王信国, 曹代勇, 何建坤. 柴北缘西大滩矿区煤系沉降—埋藏史研究[J]. 中国煤炭地质, 2008, (10): 31-33.
[41] 闫晟. 柴北缘西大滩地区页岩气成藏条件研究[D]. 西安：西安科技大学, 2013.
[42] 戴俊生, 叶兴树, 汤良杰, 等. 柴达木盆地构造分区及其油气远景[J]. 地质科学, 2003, (3): 291-296.
[43] LI M, SHAO L Y, LU J, *et al*. Sequence stratigraphy and paleogeography of the Middle Jurassic coal measures in the Yuqia coalfield, northern Qaidam Basin, northwestern China[J]. Aapg Bulletin, 2014, 98(12): 2531-2550.
[44] 胡受权, 郭文平, 曹运江, 等. 柴达木盆地北缘构造格局及在中、新生代的演化[J]. 新疆石油地质, 2001, (1): 13-16+89-90.
[45] 闫占冬. 柴达木盆地北缘西段侏罗纪原型盆地研究[D]. 西安：西北大学, 2017.
[46] 陈志勇, 肖安成, 周苏平, 等. 柴达木盆地侏罗系分布的主控因素研究[J]. 地学前缘, 2005, (3): 149-155.
[47] 王永卓, 徐景祯. 柴北缘中、下侏罗统生、排烃史模拟[J]. 石油勘探与开发, 2003, (1): 49-53.
[48] 高先志, 陈发景. 柴达木盆地北缘西段油气成藏机理研究[J]. 地球科学, 2002, (6): 757-762.
[49] 焦龙进. 柴达木盆地北缘西大滩地区侏罗系页岩气储层研究[D]. 延安：长安大学, 2013.
[50] 蓝先洪, 申顺喜. 南黄海中部沉积岩心的稀土元素地球化学特征[J]. 海洋通报, 2002, (5): 46-53.
[51] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry, [J]. Treat Geochem, 2003: 1-64.
[52] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
[53] 李善平, 潘彤, 严兴鹏, 等. 柴北缘东段茶卡北山伟晶岩稀土元素地球化学特征及物源分析[J]. 稀土, 2022, 43(4): 88-99.
[54] 李斌凯. 青藏高原富硼盐湖的物质来源与迁移富集过程及形成模式[D]. 西宁：中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2022.
[55] 李娜, 翟世奎, 刘新宇, 等. 琼东南盆地深水区LS33-1-1钻井岩心微量元素地球化学特征及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 1-12.
[56] 王慧玲, 姚泾利, 石小虎, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩系地球化学特征及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(8): 1502-1517.
[57] 熊万林, 龙祖烈, 朱俊章, 等. 阳江凹陷恩平21洼不同沉积环境烃源岩发育特征及成藏贡献[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 50-56.
[58] IRBER W G. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(3/4): 489-508.
[59] 穆尚涛, 邵拥军, 宋泽友, 等. 湖南仁里—传梓源伟晶岩型稀有金属矿床云母地球化学特征及其指示意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(9): 2973-2989.
[60] 姬晓燕, 张志峰, 祁风华, 等. 任家庄井田晚古生代煤系战略性金属元素富集特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 65-78.
[61] 丁允龙, 王方发, 李碧, 等. 织纳煤田龙潭组煤系富铌-稀土金属层地球化学特征及元素富集成因[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(8): 101-120.
[62] 衣姝. 西大滩矿区煤中微量元素研究[D]. 邯郸：河北工程大学, 2016.
[63] 邵龙义, 李猛, 李永红, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系页岩气地质特征及控制因素[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 311-322.
[64] 鲁静, 邵龙义, 鞠奇, 等. 柴北缘大煤沟矿区侏罗纪煤系层序地层及其煤岩变化特征[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 9-14.
[65] 胡能高, 王锐, 王晓霞, 等. 柴北缘塔塔楞环斑花岗岩的矿物学特征及岩石学意义[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(4): 337-345.
[66] 秦国红. 鄂尔多斯盆地晚古生代煤中微量元素富集特征与成因类型[J]. 北京：中国矿业大学, 2020.
[67] 张风雷, 季宏兵, 魏晓, 等. 黔中白云岩风化剖面微量元素的地球化学特征[J]. 地球与环境, 2014, 42(5): 611-619.
[68] 周科. 常量元素与微量元素特征在物源分析中的应用[J]. 辽宁化工, 2014, 43(4): 515-520.
[69] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325-343.
[70] 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.

附表1 大煤沟地区ZK14-1钻孔岩芯微量元素及稀土元素丰度值分布

Table 1 Distribution of trace elements and rare earth elements in ZK14-1 drill core in Dacoal Gou area μg/g

	ZK14-10	ZK14-15	ZK14-22	ZK14-29	ZK14-31	ZK14-35	ZK14-42	ZK14-52	ZK14-63	ZK14-70	ZK14-75	ZK14-80	ZK14-82	ZK14-86	ZK14-97	ZK14-104	ZK14-113	ZK14-119	ZK14-127	ZK14-133	ZK14-141	ZK14-146	ZK14-154	ZK14-162	ZK14-174	ZK14-177	ZK14-181	ZK14-187
Li	40.86	43.14	36.46	30.39	43.73	40.07	39.97	61.92	47.22	71.61	33.05	58.27	57.89	35.23	49.52	54.22	52.35	39.82	42.17	50.72	44.61	50.60	58.72	48.80	50.66	11.54	43.27	12.46
Be	3.09	2.68	2.52	2.96	3.55	3.04	2.72	3.88	3.35	4.60	4.67	3.14	3.15	3.37	2.85	3.30	4.72	2.49	2.90	3.87	2.66	4.09	3.73	3.02	2.70	0.51	1.71	2.46
Sc	11.63	13.74	11.98	12.36	16.01	13.76	13.57	16.11	18.12	20.81	12.27	19.10	17.05	17.46	15.76	20.53	18.73	10.98	14.05	16.44	17.79	15.92	16.76	18.29	16.00	3.45	12.85	20.89
V	63.78	74.33	88.60	68.41	109.2	95.22	84.40	136.7	155.3	112.6	124.8	114.9	106.4	78.41	100.7	91.15	121.6	70.73	90.40	112.8	82.47	95.77	112.9	103.4	93.67	13.06	71.43	94.51
Cr	57.62	69.69	63.68	66.35	89.58	67.54	77.61	80.71	106.3	66.13	52.97	96.55	83.55	57.35	63.14	68.24	62.67	48.40	55.94	61.72	49.46	56.40	64.34	70.15	63.89	16.23	30.47	22.35
Co	11.47	14.92	12.00	10.69	20.46	13.06	36.51	21.05	18.44	8.96	31.12	15.32	22.40	14.63	9.13	3.86	3.32	2.50	6.45	4.77	2.30	6.84	4.48	16.05	3.82	3.21	4.30	8.24
Ni	29.92	34.36	30.52	30.53	45.95	34.12	40.36	52.41	69.37	20.28	51.80	30.76	37.92	32.31	28.21	17.43	11.50	13.23	22.87	16.32	12.03	14.88	14.73	50.95	18.27	5.34	11.56	4.45
Cu	23.28	32.40	23.54	22.57	31.25	27.76	27.93	42.50	84.51	69.67	37.44	30.74	30.34	19.37	26.06	32.84	34.43	37.67	18.76	29.81	20.09	21.81	31.48	24.03	26.32	8.53	21.21	5.87
Zn	92.52	104.2	82.18	93.38	93.47	83.86	67.50	129.7	116.1	78.12	173.7	172.2	130.6	84.88	98.34	62.92	61.06	55.39	79.05	73.61	53.24	75.28	56.78	54.47	73.38	7.99	38.00	59.41
Ga	18.30	21.03	18.44	18.91	24.43	21.14	23.84	27.20	25.67	34.91	23.75	27.87	27.87	18.44	28.58	30.42	30.62	21.31	25.59	29.69	27.23	30.04	33.10	31.29	32.62	2.75	31.15	26.88
Rb	140.5	160.9	136.0	158.9	181.4	162.7	181.0	157.0	138.8	174.4	87.38	141.9	151.9	107.2	154.3	167.2	165.9	140.9	159.5	172.0	141.1	153.2	160.5	158.6	142.4	2.66	59.66	125.78
Sr	223.3	212.5	229.8	203.7	246.8	218.3	379.6	319.8	195.9	187.5	206.9	121.4	129.1	104.4	152.5	178.6	191.7	130.5	141.6	191.1	192.0	175.0	179.1	136.4	123.7	361.9	96.48	778.75
Y	44.42	27.91	28.40	21.00	34.68	28.47	25.32	48.06	38.59	32.17	37.07	31.68	28.50	33.39	27.26	27.43	53.80	29.74	33.23	48.03	31.03	32.48	31.13	34.18	27.21	8.48	22.35	21.90
Zr	240.7	161.4	211.8	220.7	148.1	172.8	118.6	134.3	133.9	145.1	156.3	338.1	195.1	147.7	228.7	188.3	232.9	272.3	253.1	237.3	235.7	209.4	164.0	145.9	218.1	45.70	301.6	1592.2
Nb	13.58	14.90	14.55	15.02	15.13	15.13	15.89	15.33	13.46	15.40	13.85	25.33	23.24	13.79	22.20	20.20	22.40	25.01	21.55	21.06	21.67	22.85	21.40	19.97	23.62	2.82	24.80	23.89
Sn	2.86	3.71	3.25	3.09	3.77	3.32	4.18	4.76	3.75	5.07	2.92	5.01	4.82	3.25	4.51	4.70	4.68	4.11	4.18	4.52	4.41	4.68	4.90	4.69	5.16	0.53	4.04	1.39
Cs	8.85	12.14	9.13	9.96	13.51	12.28	16.04	15.16	10.24	23.75	10.95	14.86	16.68	9.10	18.03	20.53	21.44	12.57	17.23	22.35	15.99	19.26	22.37	18.50	18.62	0.22	6.71	1.60
Hf	6.58	4.58	5.95	6.19	4.23	4.97	3.46	3.93	3.92	4.52	4.54	8.93	5.52	4.26	6.49	5.42	6.77	7.60	7.18	6.70	6.71	6.03	5.05	4.43	6.31	1.20	8.42	34.44
Ta	1.05	1.17	1.13	1.14	1.19	1.15	1.19	1.23	0.99	1.27	0.93	1.72	1.57	1.09	1.65	1.49	1.66	1.94	1.60	1.56	1.56	1.68	1.59	1.41	1.63	0.22	1.74	0.77
Pb	29.83	32.25	32.29	29.38	31.19	24.39	30.18	46.90	42.48	76.87	69.35	42.59	40.52	31.28	35.11	44.09	55.86	36.79	25.64	38.07	40.01	47.95	60.45	40.08	65.08	14.12	51.62	21.54
Th	15.75	18.06	16.29	16.43	19.80	16.78	19.90	24.82	24.40	32.62	21.08	25.14	24.04	17.55	25.54	30.99	27.47	20.93	20.51	24.04	21.14	24.71	26.54	24.07	32.40	6.08	28.49	19.88
U	2.59	2.28	2.65	2.05	2.89	2.22	2.09	5.35	5.67	6.56	7.84	6.09	5.59	3.91	3.91	5.23	9.67	4.81	3.26	7.04	4.71	7.10	7.39	6.27	6.15	0.92	5.04	1.72
La	51.86	41.09	40.41	31.95	43.93	45.98	38.42	59.77	64.05	49.80	43.80	49.80	48.55	41.29	38.54	40.28	51.76	43.49	27.31	47.75	49.59	45.39	47.64	43.36	47.99	12.61	38.31	97.76
Ce	109.0	80.03	76.70	57.71	80.78	81.91	73.34	106.5	120.7	84.77	87.46	96.43	93.42	81.18	66.86	74.29	107.4	83.46	45.66	98.24	98.50	87.85	87.75	75.62	86.12	28.48	74.65	192.49
Pr	12.35	8.98	8.69	6.74	9.86	9.83	8.66	12.68	15.46	10.86	10.24	11.73	11.28	9.13	7.59	8.20	12.71	9.56	4.93	11.37	11.67	10.16	10.70	9.99	11.10	2.98	7.42	22.83
Nd	45.28	32.53	31.15	23.59	36.40	34.95	30.36	45.56	51.99	34.79	36.18	38.30	36.62	32.39	27.83	30.09	41.46	33.34	17.63	38.02	39.08	33.04	35.06	33.22	34.99	10.17	26.24	85.72
Sm	9.23	6.26	6.10	4.42	7.24	6.79	6.12	9.22	10.33	6.93	7.35	7.54	7.21	6.57	5.49	6.22	8.73	6.75	3.68	8.07	7.82	6.56	6.93	7.08	6.64	1.92	4.91	13.18
Eu	1.83	1.22	1.17	0.76	1.37	1.28	1.08	1.79	1.92	1.33	1.41	1.42	1.29	1.25	1.07	1.20	1.75	1.29	0.77	1.65	1.47	1.29	1.36	1.37	1.19	0.48	0.89	4.69
Gd	8.49	5.48	5.20	3.65	6.50	5.75	5.01	8.24	8.64	5.58	6.28	6.22	5.74	5.74	4.70	5.10	7.86	5.52	3.68	7.28	6.16	5.53	5.74	6.00	5.11	1.66	3.68	9.65
Tb	1.33	0.89	0.81	0.57	1.02	0.86	0.81	1.25	1.30	0.96	1.04	0.97	0.91	0.93	0.77	0.84	1.37	0.92	0.71	1.25	0.96	0.92	0.94	1.01	0.87	0.26	0.62	1.26
Dy	7.76	5.22	4.98	3.56	6.08	5.22	4.78	7.95	7.42	5.72	6.49	5.67	5.35	5.60	4.61	4.96	8.72	5.69	4.82	7.62	5.62	5.48	5.56	5.84	5.07	1.59	3.80	6.39
Ho	1.48	1.01	1.01	0.72	1.22	1.00	0.94	1.55	1.42	1.20	1.33	1.16	1.12	1.14	0.97	0.99	1.85	1.07	1.09	1.66	1.13	1.16	1.13	1.22	1.01	0.31	0.78	1.09

续表附表1　　μg/g

	ZK14-10	ZK14-15	ZK14-22	ZK14-29	ZK14-31	ZK14-35	ZK14-42	ZK14-52	ZK14-63	ZK14-70	ZK14-75	ZK14-80	ZK14-82	ZK14-86	ZK14-97	ZK14-104	ZK14-113	ZK14-119	ZK14-127	ZK14-133	ZK14-141	ZK14-146	ZK14-154	ZK14-162	ZK14-174	ZK14-177	ZK14-181	ZK14-187
Er	3.89	2.89	2.84	2.19	3.39	2.90	2.68	4.38	4.01	3.53	3.73	3.29	3.05	3.35	2.78	2.85	5.39	3.13	3.29	4.64	3.15	3.25	3.14	3.40	2.82	0.84	2.28	2.51
Tm	0.51	0.42	0.42	0.35	0.49	0.42	0.40	0.62	0.58	0.56	0.54	0.50	0.47	0.50	0.42	0.44	0.82	0.46	0.52	0.71	0.48	0.49	0.48	0.51	0.43	0.12	0.36	0.32
Yb	3.18	2.79	2.76	2.34	3.17	2.80	2.60	4.06	3.79	3.81	3.53	3.37	3.10	3.43	2.87	2.95	5.30	3.14	3.46	4.69	3.22	3.32	3.08	3.39	2.88	0.74	2.44	2.04
Lu	0.48	0.42	0.44	0.37	0.48	0.42	0.39	0.59	0.57	0.56	0.50	0.51	0.45	0.50	0.43	0.43	0.79	0.46	0.52	0.70	0.48	0.49	0.46	0.48	0.41	0.10	0.36	0.31
δCe	1.06	1.02	1.00	0.96	0.95	0.95	0.99	0.95	0.94	0.89	1.01	0.98	0.98	1.03	0.96	1.00	1.03	1.00	0.97	1.03	1.00	1.00	0.95	0.89	0.92	1.14	1.09	1.00
δEu	0.41	0.39	0.39	0.34	0.39	0.38	0.36	0.40	0.38	0.39	0.40	0.38	0.37	0.40	0.40	0.40	0.43	0.40	0.44	0.43	0.39	0.40	0.40	0.41	0.36	0.50	0.36	0.64
$(La/Sm)_N$	3.63	4.24	4.28	4.67	3.92	4.37	4.06	4.19	4.01	4.64	3.85	4.27	4.35	4.06	4.54	4.18	3.83	4.16	4.80	3.82	4.10	4.47	4.44	3.96	4.67	4.23	5.05	4.79
$(La/Yb)_N$	11.69	10.56	10.51	9.81	9.94	11.78	10.61	10.55	12.12	9.39	8.91	10.62	11.23	8.65	9.64	9.78	7.01	9.95	5.66	7.30	11.04	9.81	11.09	9.17	11.97	12.18	11.26	34.35
$(Gd/Yb)_N$	2.21	1.62	1.56	1.29	1.70	1.70	1.59	1.68	1.89	1.21	1.47	1.53	1.53	1.39	1.36	1.43	1.23	1.46	0.88	1.28	1.58	1.38	1.54	1.46	1.47	1.85	1.25	3.91
∑REE	194.3	181.7	187.5	197.6	171.0	194.2	176.9	175.0	184.9	165.5	169.3	205.9	196.3	162.3	191.7	182.1	151.1	197.5	181.2	157.5	194.0	185.4	186.0	167.5	210.5	213.8	230.6	527.6
Zr/Hf	36.58	35.20	35.58	35.63	35.00	34.77	34.22	34.16	34.13	32.11	34.43	37.85	35.33	34.65	35.24	34.76	34.42	35.83	35.23	35.45	35.15	34.70	32.50	32.91	34.55	38.08	35.81	46.23
V/Cr	1.11	1.07	1.39	1.03	1.22	1.41	1.09	1.69	1.46	1.70	2.36	1.19	1.27	1.37	1.59	1.34	1.94	1.46	1.62	1.83	1.67	1.70	1.75	1.47	1.47	0.80	2.34	4.23
Ni/Co	2.61	2.30	2.54	2.86	2.25	2.61	1.11	2.49	3.76	2.26	1.66	2.01	1.69	2.21	3.09	4.51	3.47	5.30	3.55	3.42	5.24	2.17	3.29	3.18	4.78	1.66	2.69	0.54
V/(V+Ni)	0.68	0.68	0.74	0.69	0.70	0.74	0.68	0.72	0.69	0.85	0.71	0.79	0.74	0.71	0.78	0.84	0.91	0.84	0.80	0.87	0.87	0.87	0.88	0.67	0.84	0.71	0.86	0.96
U/Th	0.16	0.13	0.16	0.12	0.15	0.13	0.11	0.22	0.23	0.20	0.37	0.24	0.23	0.22	0.15	0.17	0.35	0.23	0.16	0.29	0.22	0.29	0.28	0.26	0.19	0.15	0.18	0.09

附表2　ZK14-1钻井岩芯沉积物微量元素变化范围及平均丰度

Table 2　Variation range and average abundance of trace elements in ZK14-1 drilling core sediments　　μg/g

地层		Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cs	Ta	Hf	Pb	Th	U
白垩系 381 ~ 603 m	平均值	45.7	3.34	15.28	100.93	73.97	17.93	38.62	35.95	107.31	23.7	148.56	212.78	32.83	180.32	16.04	3.84	13.05	1.2	5.11	39.96	20.9	4.13
	最大值	71.61	4.67	20.81	155.3	106.27	36.51	69.37	84.51	173.66	34.91	181.36	379.61	48.06	338.09	25.33	5.07	23.75	1.72	8.93	76.87	32.62	7.84
	最小值	30.39	2.52	11.63	63.78	52.97	8.96	20.28	19.37	67.5	18.3	87.38	104.36	21	118.56	13.46	2.86	8.85	0.93	3.46	24.39	15.75	2.05
采石岭组 628 ~ 693 m	平均值	49.19	3.4	16.33	97.61	58.92	4.85	16.8	28.11	68.41	28.51	157.17	170.23	34.9	224.64	22.04	4.52	18.86	1.64	6.44	42.66	24.65	5.9
	最大值	58.72	4.72	20.53	121.61	68.24	9.13	28.21	37.67	98.34	33.1	171.99	191.97	53.8	272.33	25.01	4.9	22.37	1.94	7.6	60.45	30.99	9.67
	最小值	39.82	2.49	10.98	70.73	48.4	2.3	11.5	18.76	53.24	21.31	140.87	130.53	27.26	164.02	20.2	4.11	12.57	1.49	5.05	25.64	20.51	3.26
石门沟组 693 ~ 706 m	平均值	49.73	2.86	17.15	98.53	67.02	9.93	34.61	25.18	63.93	31.96	150.53	130.04	30.7	181.99	21.79	4.93	18.56	1.52	5.37	52.58	28.23	6.21
	最大值	50.66	3.02	18.29	103.38	70.15	16.05	50.95	26.32	73.38	32.62	158.63	136.39	34.18	218.11	23.62	5.16	18.62	1.63	6.31	65.08	32.4	6.27
	最小值	48.8	2.7	16	93.67	63.89	3.82	18.27	24.03	54.47	31.29	142.43	123.69	27.21	145.87	19.97	4.69	18.5	1.41	4.43	40.08	24.07	6.15
大煤沟组 706 ~ 733 m	平均值	22.42	1.56	12.4	59.67	23.02	5.25	7.12	11.87	35.13	20.26	62.7	412.39	17.58	646.48	17.17	1.98	2.85	0.91	14.69	29.1	18.15	2.56
	最大值	43.27	2.46	20.89	94.51	30.47	8.24	11.56	21.21	59.41	31.15	125.78	778.75	22.35	1592.17	24.8	4.04	6.71	1.74	34.44	51.62	28.49	5.04
	最小值	11.54	0.51	3.45	13.06	16.23	3.21	4.45	5.87	7.99	2.75	2.66	96.48	8.48	45.7	2.82	0.53	0.22	0.22	1.2	14.12	6.08	0.92

Study on the Enrichment Characteristics of Rubidium in the Coal-Bearing Strata in the Middle Section of the Northern Margin of Qaidam Basin

XU Weiping[1], LI Binkai[2], LI Wenxia[2*], HAN Wenhua[2], QI Zhaolin[1], ZHANG Shijia[3], ZHAO Jincheng[3]

(1. *School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining*, 810016; 2. *Key Laboratory of Green and High-end Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining*, 810008; 3. *Qinghai Institute of Coal Geological Exploration, Xining*, 810000, *China*)

Abstract: Rubidium plays a key role in many high-tech fields, and its demand is increasing year by year. The middle part of the northern margin of Qaidam Basin is a distribution area of coal-bearing strata, and its strata are mainly Jurassic sedimentary strata. In recent years, a large number of studies have shown that resource elements such as rubidium, lithium, and cesium are enriched in coal-bearing strata, but the enrichment process of rubidium and other elements in sedimentary strata is still unclear. Therefore, the geochemical characteristics of trace elements and rare earth elements in the core of the west side of the Dameigou Mine on the northern margin of the Qaidam Basin are studied, and the evolution characteristics and tectonic environment of the sedimentary strata in this area are discussed, and the enrichment law of rubidium in the diagenesis process is attempted. The results showed that the content of trace elements such as Rb (142.3 μg/g), Cs (14.2 μg/g), Li (44.6 μg/g), Ga (25.5 μg/g) and Th (22.3 μg/g) was higher, which was higher than that of sediments in China, providing a material basis for the mineralization of rare metals. The elemental correlation showed that Rb had a strong metallogenic correlation with Cs, Li, Be and other elements. The correlation between Sc, V, Co, Ni, Cu and Zn was weak. According to the ratios of V/Cr, Ni/Co and V/(V + Ni), it is judged that the sedimentary process is in an oxic-dysoxic-anoxic environment, and the Sr/Ba ratio indicates that it is in the sea-land interaction facies-continental sedimentation. The material sources of Rb and other elements are mainly Tatareng plutons, which migrate ore-bearing elements to coal-bearing strata through surface water or underground runoff through weathering, denudation, transportation, and deposition. The research results provide a certain basis for the exploration and research of rubidium deposits.

Key words: Coal strata; Rubidium; Enrichment process; Geochemistry; The middle section of the northern margin of Qaidam Basin