

新疆阿尔泰不同矿化类型伟晶岩中磷的分布特征及其找矿指示

吕正航¹, 张辉¹, 唐勇¹, 赵景宇², 刘云龙¹, 郭柳¹

1. 中国科学院 地球化学研究所 地球内部物质与高温高压院重点实验室, 贵阳 550081;
2. 宿州学院, 安徽 宿州 234000

摘要: 新疆阿尔泰是伟晶岩型稀有金属矿床的重要产区, 长期开采使其面临资源枯竭, 加之传统物理找矿方法的局限性, 迫切需求实现找矿方法创新和找矿突破。与稀有金属成矿有关的过铝质岩石通常以富 P 为特征, 本文利用电子探针分析了阿尔泰地区二叠纪和三叠纪 4 类伟晶岩中碱性长石的 P₂O₅ 含量, 并对 P 的分布特征进行了分析和统计, 以验证前人提出的找矿指标并圈定找矿靶区。结果表明, 贫瘠伟晶岩 P 含量普遍较低 (P₂O₅ < 0.1%), 而复杂矿化伟晶岩的 P 含量普遍较高 (P₂O₅ ≥ 0.1%)。符合前人提出的碱性长石中 P₂O₅ 含量高于 0.1% 可作为伟晶岩型稀有金属矿床的找矿指标。二叠纪和三叠纪矿化伟晶岩的 P 含量对比发现, 前者 P 含量普遍较低, 其成矿潜力较为有限; 而三叠纪的青河-哈龙成矿亚带中的伟晶岩中的 P 含量普遍较高, 其中的可可托海-喀拉额尔齐斯河上游一带应是稀有金属找矿的重要靶区。

关键词: 磷分布特征; 伟晶岩; 稀有金属; 找矿指示; 新疆阿尔泰

中图分类号: P595 文章编号: 1007-2802(2018)02-0260-11 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.028

The Distribution of Phosphorous in Various Types of Pegmatites from Altai, Xinjiang and Its Implication

LV Zheng-hang¹, ZHANG Hui¹, TANG Yong¹, ZHAO Jing-yu², LIU Yun-long¹, GUO Liu¹

1. Key Laboratory of High-temperature and High-pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Suzhou University, Suzhou Anhui 234000, China

Abstract: The Xinjiang Altai is an important area of rare metal resources which are going to be exhausted because of the long-term exploitation and the limitation of traditional geophysical methods for prospecting rare metal ore deposits. Thus, it is urgently required to innovate exploration method and make breakthrough in exploration of rare metal resources. Previous studies suggest that prealuminous rocks with mineralization of rare metal are commonly characterized with high P content. The analyses of P₂O₅ contents in alkaline feldspars from four types of pegmatites by using EPMA and the statistics on P contents in pegmatites have been conducted in this work, in order to verify the prospecting indicators proposed by previous studies and outline prospecting target. The results demonstrate that the barren pegmatites are characterized with low P contents (P₂O₅ < 0.1%), whereas the mineralized pegmatites are characterized with high P contents (P₂O₅ ≥ 0.1%). Therefore, this work supports that the P₂O₅ > 0.1% of alkaline feldspar is an effective indicator for prospecting rare metal ore deposits of pegmatite. It is noticed that P contents of the Permian mineralized pegmatites are generally lower than those of the Triassic mineralized pegmatites, we suggest that the Permian pegmatites have relatively low potential for finding rare metal resources. As the Triassic pegmatites in the Halong-Qinghe subzone commonly have high P contents, it is suggested that the rare metal exploration should be concentrated in a target area from the Keketuohai to the upstream of the Kalaeerqisi river in the Xinjiang Altai.

收稿编号: 2017-179 2017-07-01 收到 2017-08-03 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41372104, 41403016); 新疆有色金属工业集团地质科研项目 (YSKY2011-02); 贵州省科技项目 (2015GZ77802)

第一作者简介: 吕正航 (1984-), 男, 助理研究员, 研究方向: 矿物岩石矿床. E-mail: lvzhenghang@vip.gyig.ac.cn.

Key words: distribution of phosphor; pegmatite; rare metal; prospecting indicator; The Xinjiang Altai

阿尔泰造山带是世界上最大的伟晶岩省之一,中国阿尔泰作为其主要组成部分,以发育巨量花岗伟晶岩及盛产 Li、Be、Nb、Ta 等稀有金属矿产而闻名。区内分布有 38 个伟晶岩田和近十余条伟晶岩脉,其中形成了以可可托海 3 号脉超大型 Li-Be-Nb-Ta-Cs-Zr-Hf 为代表的数十个稀有金属矿床(邹天人和李庆昌,2006)。已有年代学研究表明,阿尔泰伟晶岩的形成时代贯穿整个造山运动,从奥陶纪-侏罗纪且主要形成于二叠纪和三叠纪,并在三叠纪达到成岩成矿峰值(王登红等,2002; Zhu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007; 任宝琴等,2011; Lv *et al.*, 2012; 秦克章等,2013; Liu *et al.*, 2014; 马占龙等,2015; 刘文政等,2015; Zhang *et al.*, 2016a; Zhou *et al.*, 2016),如可可托海 3 号伟晶岩超大型 Li-Be-Nb-Ta-Cs-Zr-Hf 矿床成矿时代为 220~208 Ma(Zhu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007; 陈剑锋,2011; Liu *et al.*, 2014),卡鲁安 650、805、806、807 超大型 Li 矿床形成于 228~211 Ma(马占龙等,2015)柯鲁木特 112 号脉大型 Li-Be-Nb-Ta 矿床时代为 238~211 Ma (Lv *et al.*, 2012),阿斯喀尔特中型 Be 矿床形成于 218 Ma(刘文政等,2015)。

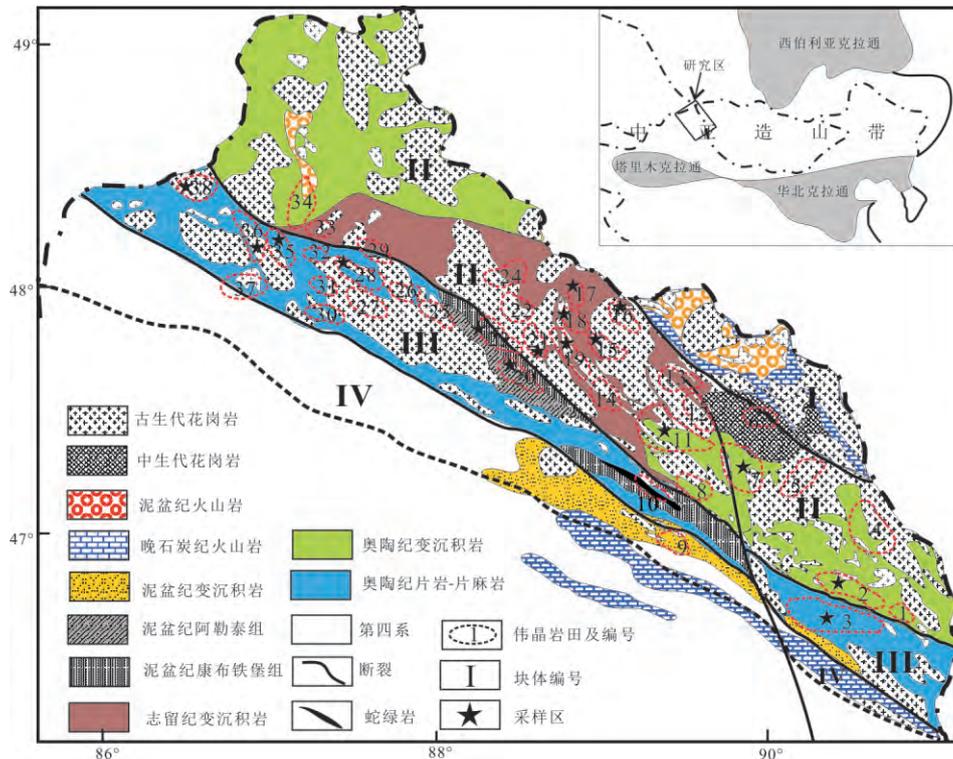
稀有金属是重要的战略资源,新疆阿尔泰伟晶岩型稀有金属矿产对国防建设和国民经济发展做出过重要贡献。然而,经半个多世纪的开发,阿尔泰现有的稀有金属资源已面临枯竭,亟待实现矿产资源量的增储。但利用传统电、磁和重力等地球物理方法找矿成效甚微;此外,伟晶岩常呈脉体产出,规模有限且掩埋较深,矿化越复杂的伟晶岩其内部带也越多,且不同的稀有金属元素矿化常常局限于不同的结构带中,难以通过露头对其含矿性进行全面评价,因而有必要寻求新的地球化学找矿方法以尽快实现找矿突破。

已有研究表明,与稀有金属 Li、Be、Nb、Ta、W、Sn 等成矿有重大关系的过铝质岩石(伟晶岩、花岗岩和流纹岩)常以富 P 为特征(MacDonald and Clarke, 1985; London, 1998; Raimbault and Burol, 1998; Broska *et al.*, 2004; 唐勇, 2008a)。Bea 等(1994)通过对西班牙伊比利亚中部的 S 型 W-Sn 矿化花岗岩的研究,提出全岩 $P_2O_5 > 0.5\%$ 可作为稀有金属矿化的指标。Tang 等(2013)对阿尔泰 20 条稀有金属矿化伟晶岩脉和 60 条无矿化伟晶岩脉中的碱性长石中的 P_2O_5 含量的对比发现,前者含量较高为 0.10%~0.40%,后者为 0.01%~0.05%,由此

提出碱性长石中 P_2O_5 含量高于 0.10% 可作为伟晶岩型稀有金属矿床的找矿指标。笔者系统采集了阿尔泰不同矿化类型伟晶岩脉中的碱性长石,测试了其中的 P_2O_5 含量,统计不同类型伟晶岩中 P 的分布特征,同时开展了二叠纪和三叠纪伟晶岩中 P 含量及分布特征与伟晶岩含矿性关系研究,这对伟晶岩型稀有金属伟晶岩矿床的找矿、成矿远景区的划分、成矿物源识别有着重要的指示意义。

1 区域地质

阿尔泰造山带是中亚造山带的重要组成部分之一,跨越了哈萨克斯坦东部、俄罗斯西南部、中国西北部和内蒙古南部,位于萨彦地块以南,哈萨克斯坦-准葛尔地块以北(Windley *et al.*, 2002),从北西向东南绵延千余公里。中国阿尔泰位于新疆自治区最北部,东与内蒙古、外蒙,北与俄罗斯,西与哈萨克斯坦相毗邻,南边以额尔齐斯河为界与准葛尔盆地相隔。根据地层分布、变形变质、岩浆活动和年代学研究进展,将阿尔泰划分为 4 个部分(图 1; Yuan *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2008)。北阿尔泰构造带(I)主要地层为泥盆纪-石炭纪碎屑沉积岩及火山碎屑岩组合,岩浆岩以晚古生的 I 型花岗岩为主,伟晶岩数量较少。中阿尔泰构造带(II)是阿尔泰山的重要组成部分,广泛出露早古生代奥陶-志留纪的巨厚浊积岩和火山碎屑岩序列,以及角闪岩相至绿片岩相的变质沉积岩和火山岩,即哈巴河群和库鲁木提群(Long *et al.*, 2007, 2010)。岩浆岩分布广泛,以早中生代 I 型花岗岩为主, S 型花岗岩次之,晚古生代-早中生代花岗岩较少(Yuan *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009; Cai *et al.*, 2011a, 2011b; Zhang *et al.*, 2016b)。稀有金属矿化伟晶岩数量较多且分布广泛。近年来对花岗岩的锆石年龄和同位素研究表明,中阿尔泰构造带可能存在元古代基底(Wang *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2017)。琼库尔构造带(III)主要由中泥盆浊积砂页岩序列(阿勒泰组)以及上覆的早石炭岛弧火山碎屑岩(康布铁堡组)组成,变质程度为角闪岩-绿片岩相(Long *et al.*, 2007, 2008)。花岗岩以中生代的 I 型花岗岩为主,其次是二叠纪 A 型花岗岩,数量较多但规模有限,呈线性展布(Liu *et al.*, 2017)。该区域也发育较多的伟晶岩脉。南阿尔泰构造带(IV)与北阿尔泰构造带(I)组成类似,主要包括含化石的石炭纪地层和上覆的晚石炭世沉积



CAOB-中亚造山; I-北阿尔泰构造带; II-中阿尔泰构造带; III-琼库尔构造带; IV-南阿尔泰构造带。伟晶岩田: 1-阿木拉宫; 2-布鲁克特-纳林萨拉; 3-阿拉捷克-塔拉特; 4-米尔特根; 5-琼湖-道尔久; 6-阿拉尔; 7-可可托海; 8-柯布卡尔; 9-富蕴西; 10-库尔图; 11-库威-结别特; 12-丘曲拜; 13-阿拉依格尔; 14-蒙库; 15-阿拉山; 16-柯鲁木特-吉得克; 17-阿祖拜; 18-群库尔; 19-虎斯特; 20-大喀拉苏-可可西尔; 21-胡鲁宫; 22-巴塞-阿巴宫; 24-吐尔贡; 25-卡拉苏; 26-切米尔切克; 27-塔尔朗; 28-切别林; 29-阿尔尔克; 30-阿克赛依-阿克苏; 31-阿克巴斯塔乌; 32-萨尔加克; 33-乌鲁克特; 34-切伯罗依-阿克贡盖特; 35-海流滩-冲乎尔; 36-也留曼; 37-哈巴河东; 38-加曼哈巴。图件修改自 Wang 等(2007) 以及邹天人和李庆昌(2006)

图1 中国阿尔泰区域地质及伟晶岩田分布图

Fig.1 Regional geological map of the Chinese Altai and distribution of pegmatite fields

建造,片麻岩和片岩局部存在。花岗岩和伟晶岩较少发育。

伟晶岩主要集中在中阿尔泰和琼库尔地体,分为两个成矿亚带和38个伟晶岩田。位于中阿尔泰的哈龙-青河成矿亚带由22个伟晶岩田组成:阿木拉宫、布鲁克特-纳林萨拉、米尔特根、琼湖-道尔久、阿拉尔、可可托海、柯布卡尔、库威-结别特、丘曲拜、阿拉依格尔、蒙库、阿拉山、柯鲁木特-吉得克、阿祖拜、群库尔、虎斯特、胡鲁宫、巴塞、吐尔贡、阿尔尔克、乌鲁克特、切伯罗依-阿克贡盖特,矿化类型丰富,规模较大,以可可托海3号伟晶岩超大型Li-Be-Nb-Ta-Cs-Zr-Hf矿床,卡鲁安超大型Li矿床,柯鲁木特大型Li-Be-Nb-Ta矿床和阿斯卡尔特中型Be矿床为代表。位于琼库尔地体的加曼哈巴-大喀拉苏成矿亚带由15个伟晶岩田组成:阿拉捷克-塔拉特、库尔图、大喀拉苏-可可西尔、阿巴宫、卡拉苏、切米尔切克、塔尔朗、切别林、阿克赛依-阿克苏、阿克巴斯塔乌、萨尔加克、海流滩-冲乎尔、也留

曼、哈巴河东、加曼哈巴,矿化类型和矿床规模较为有限,以Be±Nb-Ta的中-小型矿床或矿化点为主,Li矿床尤其稀少。仅有富蕴西1个伟晶岩田分布于南阿尔泰构造带中(邹天人和李庆昌,2006)。

2 样品采集及分析方法

本次分析样品采自538条脉体,其中青河地区(包括布鲁克特-纳林萨拉、阿拉捷克-塔拉特伟晶岩田)101条、可可托海伟晶岩田113条、库威伟晶岩田107条、阿拉山伟晶岩田27条、柯鲁木特-吉得克伟晶岩田52条、卡鲁安伟晶岩田30条、佳木开-琼库尔伟晶岩田42条、哈拉额尔齐斯河上游(包括阿祖拜、虎斯特、阿巴宫和胡鲁宫)36条,以及加曼哈巴-大喀拉苏亚带(包括大喀拉苏伟晶岩田、切别林伟晶岩田、海流滩伟晶岩田、也留曼伟晶岩田和加曼哈巴伟晶岩田)30条。根据前人工作、野外矿石矿物观察以及伟晶岩演化程度与矿化类型的关系,本次研究将伟晶岩分为贫瘠型(已证实无矿化)、简

单矿化型($Be \pm Nb \pm Ta$, 部分已开采)和复杂矿化型($Li \pm Be \pm Nb \pm Ta \pm Cs$, 多数已开采)及待评价伟晶岩脉(露头有限且未见矿石矿物和未进行评价的脉体)(表1)。样品主要为边缘带出露的文象带或块体微斜长石带中的钾长石样品,少数未出露钾长石的脉体则采集钠长石样品。对538件样品进行光薄

片磨制,镜下观察其结构和期次,圈出新鲜原生的长石。每个样品分析5~10个点,进行加权平均统计。电子探针分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,采用EPMA-1600型电子探针,运行条件为:25 kV加速电压,电流为10 nA,束径为10 μm 。Si、Al、Na、K、Ca的信号

表1 4种类型伟晶岩的地质特征

Table 1 Geological features of four types of pegmatites

伟晶岩类型	脉体规模	结构带	矿化特征	典型伟晶岩
贫瘠型	脉体长度通常<100 m,宽数十厘米至数米,延深有限	无明显分带,或仅有文象带、块体长石带、石英-白云母带 \pm 石英核带	无矿化	青海西南边未分异伟晶岩
简单矿化型	脉体长度从数十米至数百米,宽数米,有一定的延深	通常包括文象带、块体长石带、石英-白云母带和石英核带	通常在边缘带和中间带发育矿石矿物绿柱石和/或铌钽矿	大喀拉苏 Be-Nb-Ta 矿床
复杂矿化型	脉体长度>100 m,部分>1000 m,宽数米至数百米,延深>100 m	包括简单矿化型所有的结构带,此外还发育糖粒状钠长石带、叶钠长石-石英-锂辉石带,极少数还发育锂云母-薄片钠长石带等	通常边缘带以 Be 矿化为主,中间带以 Li-Nb-Ta 矿化为主,晚期结构带出现 Cs 矿化。部分脉体为全脉 Li 矿化	可可托海 3 号脉 柯鲁木特 112 号脉 卡鲁安锂矿床
待评价型	包含前两种脉体类型的规模	通常露头仅见文象带和/或块体长石带	大多数脉体矿化情况未知,少数脉体可见绿柱石	大桥旱田队伟晶岩

表2 阿尔泰伟晶岩碱性长石 P_2O_5 含量统计

Table 2 Statistics of P_2O_5 contents in alkaline feldspar from various pegmatites in the Xinjiang Altai

伟晶岩田	类型	数量/条	P_2O_5		伟晶岩田	类型	数量/条	P_2O_5	
			含量/%	平均值/%				含量/%	平均值/%
可可托海	贫瘠	23	0.01~0.09	0.05	库威	贫瘠	41	0.00~0.09	0.04
		3	0.10~0.11	0.1			4	0.10~0.14	0.12
	简单	15	0.01~0.09	0.05		简单	2	0.02~0.05	0.04
		12	0.10~0.27	0.17			8	0.10~0.47	0.23
	复杂	4	0.11~0.43	0.24		待评价	40	0.01~0.09	0.05
待评价	42	0.01~0.09	0.06	12	0.12~0.25	0.16			
柯鲁木特	贫瘠	9	0.01~0.09	0.04	哈拉额尔齐斯河上游	贫瘠	12	0.03~0.09	0.05
		3	0.04~0.06	0.05			9	0.10~0.21	0.15
	简单	15	0.10~0.62	0.22		简单	5	0.01~0.09	0.04
		1	0.18~0.20	0.19			10	0.10~0.99	0.41
	复杂	11	0.03~0.09	0.07		待评价	6	0.03~0.09	0.06
待评价	13	0.10~0.23	0.13	7	0.11~0.21	0.16			
卡鲁安	贫瘠	5	0.01~0.05	0.03	佳木开-群库尔	贫瘠	9	0.02~0.09	0.05
		2	0.10~0.43	0.27			简单	20	0.11~1.09
	复杂	5	0.01~0.08	0.04		待评价		8	0.01~0.09
		14	0.10~0.52	0.18			5	0.10~0.14	0.12
	待评价	2	0.04~0.05	0.05		阿拉山	贫瘠	8	0.01~0.09
2	0.25~0.26	0.26	2	0.10~0.15	0.13				
青河	贫瘠	8	0.01~0.08	0.03	简单		1	0.02~0.05	0.03
		11	0.10~0.81	0.28			14	0.01~0.09	0.05
	简单	1	0.01~0.09	0.04	待评价		2	0.11~0.20	0.16
		2	0.21~0.54	0.38		6	0.00~0.06	0.03	
	复杂	3	0.18~0.48	0.30	加曼哈巴-大喀拉苏	贫瘠	1	0.12	0.12
76		0.10~1.03	0.35	简单			10	0.01~0.09	0.03
待评价	2	0.10~0.13	0.12			待评价	3	0.12~0.19	0.14
				8			0.01~0.07	0.04	
				2		0.10~0.13	0.12		

采集时间为 10 s, P 为 90 s。P 元素检测限为 0.01%。采用天然矿物为标样对 Si、Al、K(透长石, 64.67% SiO₂, 18.76% Al₂O₃, 12.11% K₂O)、Na(钠长石, 11.59% Na₂O)、Ca(普通辉石 4.65% Ca₂O)和 P(磷灰石, 42.21% P₂O₅)元素进行标定。所有数据均进行原子序数校正、吸收校正和荧光校正(ZAF)结果见表 2 和图 2。

3 电子探针分析结果

3.1 可可托海伟晶岩

贫瘠伟晶岩脉 26 条,其中 3 条的碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.10%~0.11%(平均 0.10%) 23 条脉体中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.01%~0.09%(平均 0.05%)。在简单矿化的 27 条脉体中,15 条脉中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.01%~0.09%,平均 0.05%; 12 条脉中碱性长石的 P₂O₅ 含量变化于 0.10%~0.27% 平均 0.17%。复杂矿化的 4 条脉体中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.11%~0.43%,平均 0.24%。待评价的 56 条脉体中,14 条脉体中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.10%~0.30%,平均 0.14%; 其余 42 条脉体中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.01%~0.09%,平均 0.06%(图 2a 表 2)。

3.2 柯鲁木特伟晶岩

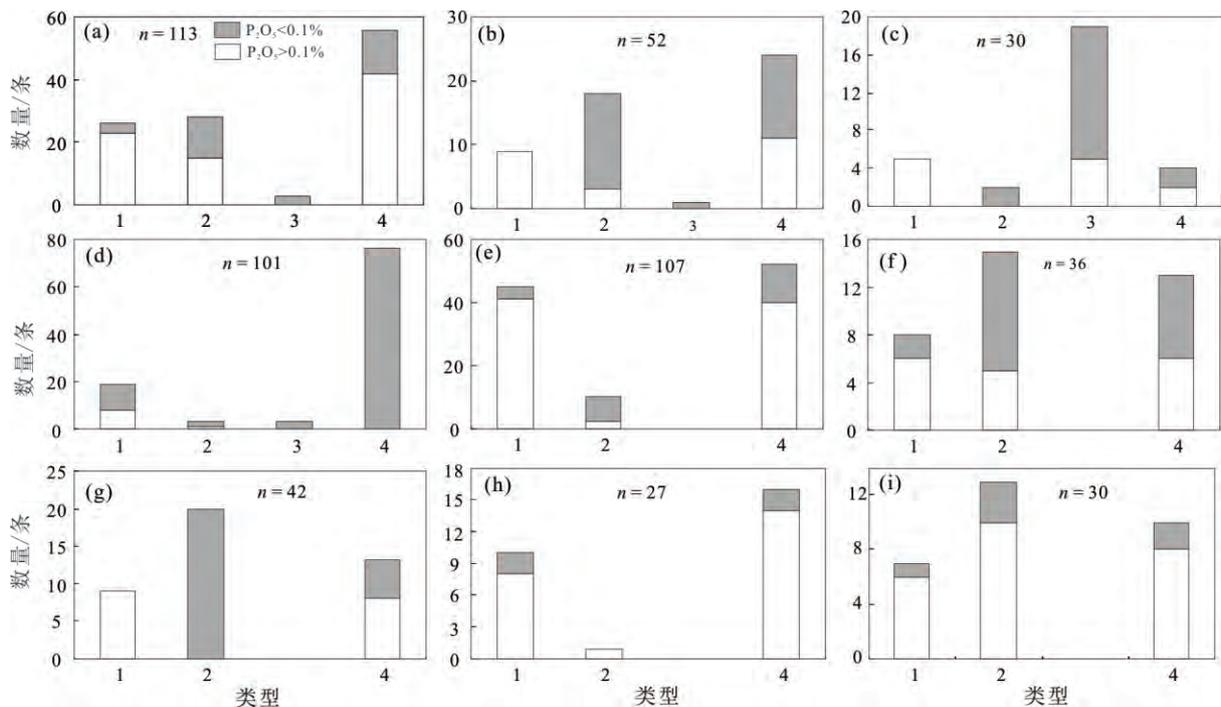
9 条贫瘠伟晶岩脉中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.01%~0.08%,平均 0.04%。在简单矿化的 18 条脉体中,其中 3 条脉中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.04%~0.06%,平均 0.05%; 15 条脉中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.10%~0.62%,平均 0.22%。复杂矿化的 1 条脉体中碱性长石含有 0.19%的 P₂O₅。在 24 条待评价伟晶岩中,11 条脉体中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.03%~0.09%,平均 0.07%; 另外 13 条脉体中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.10%~0.23%,平均 0.13%(图 2b 表 2)。

3.3 卡鲁安伟晶岩

5 条贫瘠伟晶岩中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.01%~0.05%,平均 0.03%。在简单矿化的 2 条脉体中碱性长石分别含有 0.10%和 0.43%的 P₂O₅,在复杂矿化的 19 条脉体中,5 条脉中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.01%~0.08%,平均 0.04%。其余 14 条脉中碱性长石的 P₂O₅ 含量为 0.10%~0.52%,平均为 0.18%。在 4 条待评价伟晶岩中,2 条脉体中碱性长石分别含有 0.04%和 0.05%的 P₂O₅; 另外 2 条脉中碱性长石分别含有 0.25%和 0.26%的 P₂O₅(图 2c 表 2)。

3.4 青河伟晶岩

贫瘠伟晶岩脉 19 条,其中 8 条脉体中碱性长石



伟晶岩样品来自: (a) 可可托海; (b) 柯鲁木特; (c) 卡鲁安; (d) 青河; (e) 库威; (f) 哈拉额尔齐斯河上游; (g) 佳木开-群库尔; (h) 阿拉山; (i) 加曼哈巴-大喀拉苏。伟晶岩类型: 1-贫瘠伟晶岩; 2-简单矿化伟晶岩; 3-复杂矿化伟晶岩; 4-待评价伟晶岩

图 2 阿尔泰 9 个伟晶岩区内不同类型伟晶岩中高磷和低磷脉体数量统计直方图

Fig.2 Histogram of numbers for high and low P contents in various pegmatites from nine pegmatite fields in the Xinjiang Altai

的 P_2O_5 含量为 0.01%~0.09% ,平均 0.03% ,11 条脉中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.10%~0.81% ,平均 0.28% 。简单矿化脉体 3 条 ,其中 1 条脉体的碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.04% ,2 条脉体碱性长石的 P_2O_5 含量分别为 0.21% 和 0.54% 。复杂矿化脉体 3 条 ,其碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.18~0.48% ,平均 0.30% 。76 条待评价脉体中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.10%~1.03% ,平均 0.35%(图 2d 表 2) 。

3.5 库威伟晶岩

贫瘠伟晶岩脉 45 条 ,其中 4 条脉体中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.10%~0.14% ,平均 0.12% ,41 条脉体中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.00%~0.09% ,平均 0.04% 。简单矿化脉体 10 条 ,其中 2 条脉中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.02% 和 0.05% ,8 条脉体的 P_2O_5 含量为 0.10%~0.47% ,平均 0.23% 。待评价伟晶岩脉 52 条 ,其中 12 条脉的 P_2O_5 含量为 0.12%~0.25% ,平均 0.16% ,40 条脉中的 P_2O_5 含量为 0.01%~0.09% ,平均 0.05%(图 2e 表 2) 。

3.6 哈拉额尔齐斯河上游伟晶岩

有贫瘠伟晶岩脉 8 条 ,其中 2 条脉碱性长石的 P_2O_5 含量分别为 0.10% 和 0.11% ,另外 6 条脉的 P_2O_5 含量为 0.03%~0.09% ,平均 0.05% 。简单矿化脉体 15 条 ,其中 5 条脉中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.01%~0.09% ,平均 0.04% ,其余 10 条脉的 P_2O_5 含量为 0.10%~0.99% ,平均 0.41% 。待评价伟晶岩 13 条 ,其中 6 条脉体中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.03%~0.09% ,平均 0.06% ;另外 7 条脉的 P_2O_5 含量为 0.11%~0.21% ,平均 0.16%(图 2f 表 2) 。

3.7 佳木开-琼库尔伟晶岩

9 条贫瘠伟晶岩中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.02%~0.09% ,平均 0.05% 。简单矿化的 20 条脉体的碱性长石均显示有较高 P_2O_5 含量(0.11%~1.09% ,平均 0.29%)。待评价伟晶岩脉 13 条 ,其中 8 条脉体中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.01%~0.09% ,平均 0.05% ,5 条脉中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.10%~0.14% ,平均 0.12%(图 2g 表 2) 。

3.8 阿拉山伟晶岩:

10 条贫瘠脉体 ,其中 8 条脉体的碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.01%~0.09%(平均 0.05%) ,2 条脉中碱性长石的 P_2O_5 含量分别为 0.10% 和 0.15% 。简单矿化脉体仅 1 条(Be 矿化) ,其碱性长石中的 P_2O_5 含量为 0.03% 。待评价脉体 16 条 ,其中 14 条脉体中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.01%~0.09%(平均 0.05%) ,2 条脉中碱性长石的 P_2O_5 含量分别为

0.11% 和 0.20%(图 2h 表 2) 。

3.9 加曼哈巴-大喀拉苏伟晶岩

待评价伟晶岩脉 7 条 ,其中 6 条的碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.00%~0.06% ,平均 0.03% ,1 条脉中碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.12% 。简单矿化的 13 条脉体中有 10 条的碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.01%~0.09% ,平均 0.03% ,3 条脉的碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.12%~0.19% ,平均 0.14% 。在 10 条待评价伟晶岩脉中有 8 条的碱性长石的 P_2O_5 含量为 0.01%~0.07% ,平均 0.04% ,2 条的碱性长石的 P_2O_5 含量分别为 0.10% 和 0.13%(图 2i 表 2) 。

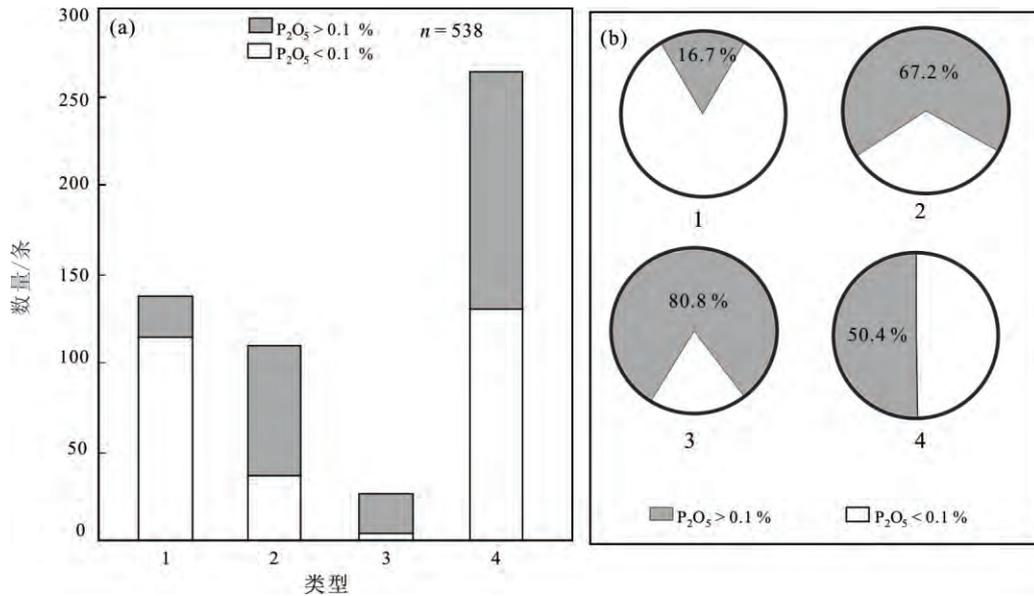
在所有脉体中 ,贫瘠伟晶岩共 138 条 ,其中高磷含量($P_2O_5 > 0.1%$)脉体 23 条(图 3a) ,比例为 16.7%(图 3b) ;简单矿化伟晶岩 110 条 ,其中高磷脉体 74 条(图 3a) ,比例为 67.3%(图 3b) ;复杂矿化伟晶岩 26 条 ,其中 21 条显示高磷特征(图 3a) ,比例为 80.8%(图 3b) ;待评价伟晶岩共 264 条 ,其中高磷含量($P_2O_5 > 0.1%$)脉体 133 条(图 3a) ,比例为 50.4%(图 3b) 。

此外 ,12 条三叠纪矿化伟晶岩中钾长石的 P_2O_5 含量为 0.07%~0.52%(仅 1 条脉低于 0.1%) ,平均 0.29% ;钠长石的 P_2O_5 含量为 0.02%~0.22% ,平均 0.10% 。5 条二叠纪矿化伟晶岩中钾长石的 P_2O_5 含量为 0.00%~0.01% ,平均低于 0.01% ;钠长石的 P_2O_5 含量为 0.00%~0.25%(仅 1 条脉高于 0.1%) ,平均 0.07%(表 3) 。

4 讨论

4.1 碱性长石中磷含量对伟晶岩稀有金属矿化的指示

伟晶岩作为产出稀有金属的重要岩石类型 ,可分为 LCT 型(富集 Li、Cs、Ta) 、NYF 型(富集 Nb、Y、F) 和混合型(兼有二者特点) (Černý *et al.* , 1991; Černý and Ercit , 2005) 。伟晶岩中磷的含量主要受控于物源、富磷矿物(如磷灰石) 溶解度及铝饱和指数(ASI) (London *et al.* , 1990) 。由于形成 LCT 型伟晶岩的物源通常为变沉积岩 ,尤其是变泥质岩和变浊积岩 ,二者部分熔融形成的高 ASI 岩浆促进磷灰石在熔体中的溶解 ,使得初始岩浆中具有较高的磷含量($P_2O_5 > 0.3%$)。NYF 型伟晶岩则与 A 型花岗岩有关 ,其物源通常含有部分幔源物质 ,所以具有相对较低的磷含量($P_2O_5 < 0.15%$) (London *et al.* , 1990) 。磷在伟晶岩中主要以磷酸盐矿物存在 ,或以类质同象方式分散于硅酸盐矿物中。伟晶岩中的磷酸盐矿物主要有磷铝石、磷锂铝石、羟磷锂铝



1-贫瘠伟晶岩; 2-简单矿化伟晶岩; 3-复杂矿化伟晶岩; 4-待评价伟晶岩

图3 阿尔泰4种类型伟晶岩中高P脉体数量统计直方图(a)和比重图(b)

Fig.3 Statistical histogram (a) and proportion chart (b) for numbers of the high P pegmatite in four types of pegmatites from the Xinjiang Altai

石、磷锰锂矿、磷铁锂矿、磷钙钼矿,以及近年来新发现的磷铋铍石和闽江石(Rao *et al.*, 2014, 2015)。在硅酸盐矿物中,磷主要以 $Al^{3+} + P^{5+} = 2Si^{4+}$ 联合置换方式进入长石类矿物中(London *et al.*, 1990)。在过铝花岗岩岩石中钾长石中的 P_2O_5 含量可高达1.0%~2.0%,而通常钠长石含有比钾长石低的 P_2O_5 含量(Frýda and Breiter, 1995),磷在钾长石和钠长石中的分配系数($D_p^{Kfs/Ab}$)约为1.2(London *et al.*, 1993)。随着岩浆分异演化的进行,长石中P的含量主要受控于体系中的Ca、REE含量及ASI(唐勇等, 2008a, 2008b)。磷在碱性长石和熔体中的分配系数($D_p^{Afs/melt}$)要满足 $D_p^{Afs/melt} = 2.05 \times ASI - 1.75$ 关系式(London *et al.*, 1993),即高的ASI促进磷分配进入碱性长石中。LCT伟晶岩作为贫Fe、Mg、Ca、REE,富集K、Na、Al和挥发分(F, B, P)的强过铝质岩石类型,相比数量有限的磷酸盐矿物(如磷灰石),磷主要进入造岩矿物碱性长石中(London *et al.*, 1990)。此外,斜长石的分离结晶可降低体系中的Ca/P值,从而抑制磷灰石饱和,促进长石中磷的富集(London *et al.*, 1990)。

已有研究表明,稀有金属矿化伟晶岩和花岗岩都含有较高的磷。如加拿大的Tanco伟晶岩,其外部带、中间带和核部带的钾长石中 P_2O_5 平均含量分别为0.36%、0.34%和0.52%;捷克Biskupice和

Radkovice伟晶岩从边缘带至核部带钾长石皆显示大于0.10%的 P_2O_5 含量(London *et al.*, 1990)。英格兰西南部的Cornwall花岗岩、法国的Beauvoir花岗岩以及捷克的Bohemian花岗岩中钾长石的 P_2O_5 平均含量分别为0.26%、0.84%和0.72%(London, 1992; Frýda and Breiter, 1995)。本文研究的阿尔泰稀有金属伟晶岩,绝大多数都显示高磷特征,如可可托海3号伟晶岩超大型Li-Be-Nb-Ta-Cs-Zr-Hf矿床,其IV带的钾长石和V带的钠长石 P_2O_5 平均含量分别为0.30%和0.13%。卡鲁安超大型Li矿床中650号和807号脉中长石的 P_2O_5 平均含量分别为0.27%和0.52%。柯鲁木特大型Li-Be-Nb-Ta矿床中长石 P_2O_5 平均含量为0.19%。其它如可可托海1号脉、库吉尔特40号脉Li-Be-Nb-Ta矿床、佳木开、群库尔、阿巴宫的Be-Nb-Ta矿床等的 P_2O_5 含量均大于0.10%(表3)。本次研究的138条贫瘠伟晶岩中,仅23条的 P_2O_5 含量高于0.10%(集中于0.10%至0.13%)(图3a),而且1/2的脉体属于青河地区未分异的伟晶岩,而136条矿化伟晶岩中碱性长石的 P_2O_5 含量为0.00%~1.09%,其中94条(约70%)的 $P_2O_5 \geq 0.10%$ (图4),符合前人提出的磷含量找矿指标。因此,本文认为碱性长石中 $P_2O_5 > 0.10%$ 可作为伟晶岩型稀有金属矿床的找矿指标。

表 3 阿尔泰二叠纪与三叠纪稀有金属伟晶岩碱性长石中 P₂O₅ 含量

Table 3 P₂O₅ contents of alkaline feldspars from Permian and Triassic rare metal mineralized pegmatites in the Xinjiang Altai

样品号	长石种类	含量/%	平均/%	矿化类型	U-Pb 年龄/Ma	
二叠纪	拜城 40 号脉 QH10-1	Kfs	0.00~0.01	0.00	Li-Be-Nb-Ta	276 (a)
		Ab	0.08~0.39	0.25		
	大喀拉苏 FH08-5	Ab	0.08~0.11	0.09	Be-Nb-Ta	270 (a)
	加曼哈巴 HB08-6	Kfs	0.00~0.03	0.01	Be	269 (a)
		Ab	0.00~0.02	0.01		
	也留曼 BRJ08-15	Kfs	0.00~0.00	0.00	Be	264 (a)
	Ab	0.00~0.03	0.01			
	大喀拉苏 FH08-1	Ab	0.00~0.00	0.00	Be-Nb-Ta	273 Ma (a)
三叠纪	可可托海 3 号脉	Kfs	0.01~0.64	0.30	Li-Be-Nb-Ta-Cs-Rb-Hf	220~209 (b, c)
		Ab	0.00~0.61	0.11		
	柯鲁木特 112 号脉	Kfs	0.18~0.20	0.19	Li-Be-Nb-Ta	238~211 (d)
		Ab	0.00~0.05	0.02		
	柯鲁木特 FH08-11	Kfs	0.18~0.20	0.19	Be-Nb-Ta	203 (a)
		Ab	0.00~0.05	0.02		
	可可托海 1 号脉 KP1-08-3	Ab	0.04~0.19	0.13	Li-Be-Nb-Ta	208 (a)
	库吉尔特 40 号脉 KP0811	Kfs	0.12~0.16	0.14	Li-Be-Nb-Ta	213 (a)
		Ab	0.07~0.12	0.09		
	虎斯特 FH-08-8	Ab	0.01~0.07	0.04	Be-Nb-Ta	244 (a)
	切别林 BRJ-08-7	Kfs	0.06~0.09	0.07	Be	241 (a)
	群库尔	Ab	0.00~0.66	0.22	Be-Nb-Ta	207(a)
	QK102	Kfs	0.00~2.89	0.64		
	阿巴宫	Ab	0.00~0.86	0.17	Be-Nb-Ta	247 (a)
	ALT101	Kfs	0.00~1.45	0.22	Be-Nb-Ta	247 (a)
	佳木开	Ab	0.00~0.67	0.11	Be-Nb-Ta	212 (a)
	JMK102	Kfs	0.00~0.81	0.16		
	卡鲁安 807 号脉 KLA-807	Kfs	0.28~0.64	0.52	Li	221 (e)
	Ab	0.07~0.16	0.13			
卡鲁安 650 号脉 KLA650	Kfs	0.22~0.51	0.43	Li-Be-Nb-Ta	228~211(e)	

注: 伟晶岩年龄来自: (a) 任宝琴等(2011) (b) Wang 等(2007) (c) Liu 等(2014) (d) Lv 等(2012) (e) 马占龙等(2015); Kfs-钾长石, Ab-钠长石。

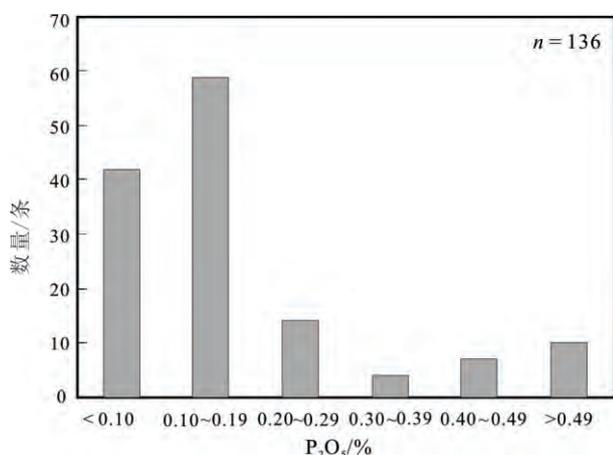


图 4 阿尔泰稀有金属矿化伟晶岩碱性长石中 P₂O₅ 含量统计直方图

Fig.4 Histogram of P₂O₅ contents of alkaline feldspars from rare metal mineralized pegmatites in the Xinjiang Altai

5.2 碱性长石中 P 含量对二叠纪和三叠纪伟晶岩的物源指示

表 3 显示,三叠纪矿化伟晶岩碱性长石的磷含量普遍高于二叠纪伟晶岩的,反映二者在物源上可能存在差异。黄永胜等(2015)曾对二叠纪和三叠纪的矿化伟晶岩形成的 *p-t* 条件进行了对比研究,结果显示三叠纪伟晶岩形成的温压为 400~581 °C 和 235~308 MPa,对应的侵位深度为 8.4~11.0 km;二叠纪伟晶岩形成的温压为 430~580 °C 和 319~406 MPa,对应的侵位深度为 11.4~14.5 km,二者的侵位深度有明显差异。近年来,笔者所在课题组对阿尔泰伟晶岩进行的系统的年代学和同位素研究表明,阿尔泰伟晶岩具有明显的时空分布特征,三叠纪伟晶岩分布广泛,分布于中阿尔泰和琼库尔构造单元,二叠纪伟晶岩则主要局限于琼库尔构造单元。此外,中阿尔泰单元中的伟晶岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较小(-1.50~+2.50)、 t_{DM2} 年龄(1350~1090) Ma 较老

(陈剑锋, 2011; Lv *et al.*, 2012; 马占龙等, 2015; 刘文政, 2015), 而琼库尔单元中的二叠-三叠纪伟晶岩则显示较大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-0.59~+10.34) 和 t_{DM2} (1316~573) Ma(未发表数据) 表明琼库尔构造单元含有更多的新生幔源物质。这一认识得到了花岗岩研究(Wang *et al.*, 2009; 王涛等, 2010) 以及野外地质证据(如基性岩脉和 A 型花岗岩广泛出露于琼库尔单元中) 证实。此外, 加曼哈巴-大喀拉苏亚带中的伟晶岩比中阿尔泰的伟晶岩也普遍显示较低的碱性长石中的磷含量(表 2)。

上述证据表明, 形成二叠纪伟晶岩的物源中可能混入了部分幔源物质, 而三叠纪伟晶岩则主要为伸展背景不成熟壳源物质部分熔融形成(Lv *et al.*, 2012; 马占龙等, 2015; 刘文政等, 2015; Zhang *et al.*, 2016a)。前者相对后者物源具有较少的壳源物质以及较低的磷含量, 加之较低的侵位深度, 从而制约了二叠纪伟晶岩岩浆内部分异演化和稀有金属富集。

5.3 阿尔泰伟晶岩田含矿性评价及成矿靶区预测

对阿尔泰 538 条伟晶岩碱性长石中 P_2O_5 含量进行测试和统计结果显示, 高磷伟晶岩($>0.1\%$) 的数量在贫瘠伟晶岩、简单矿化伟晶岩和复杂矿化伟晶岩中所占的比例分别为 16.7%、67.3% 和 80.8% (图 3b) 表明磷含量和稀有金属矿化具有密切相关性。复杂矿化伟晶岩中低磷的长石样品主要来自卡鲁安 Li 矿化伟晶岩钠长石, 这些伟晶岩内部的钠长石化非常发育, 因此不排除部分低磷长石为钠长石化样品。位于哈龙-青河成矿亚带上的可可托海、柯鲁木特、卡鲁安、库威、哈拉额尔齐斯河上游、佳木开-群库尔等伟晶岩田中的伟晶岩, 其碱性长石中 P_2O_5 含量从无矿化伟晶岩到复杂矿化伟晶岩的递增趋势尤其明显, 并且这些区域中分布的一定数量的待评价伟晶岩中碱性长石也显示了较高的磷含量(图 2a 2b 2c 2e 2f 2g)。因此, 本文认为可可托海至喀拉额尔齐斯上游一带是稀有金属找矿的重要靶区。在 264 条待评价伟晶岩中, 高磷伟晶岩数量占 50.4% (图 3), 排除普遍高磷的青河伟晶岩(原因见下文), 该比例则为 30.3%。这些待评价的高磷伟晶岩很可能具有一定的稀有金属矿化潜力。由此, 本文提出分布于可可托海至喀拉额尔齐斯上游一带中的待评价高磷伟晶岩和部分尚未被开采的简单矿化脉体, 应作为未来勘查工作的重点对象。

青河地区的伟晶岩整体上以显著的高 P_2O_5 含量(普遍高于 0.20%) 为特征, 但野外观察发现, 这

些伟晶岩呈透镜状密集、平行分布于变质沉积岩中; 其规模较小, 延伸通常小于 100 m, 宽度变化较大, 一般为十几厘米至十余米; 脉体内部基本不显示结构分带, 通常为石英、长石和少量白云母组成, 伴生少量的石榴子石和电气石副矿物。由于缺乏高度分异演化以及含 P 副矿物的结晶, 体系中的磷基本上分散进入长石中, 从而显示的高 P_2O_5 含量。少数矿化脉体显示稀有金属矿化, 如塔拉提小型 Li-Ta-Cs 矿床、拜城 40 号脉和阿木拉宫小型 Li-Be-Nb-Ta 矿床, 皆显示了较高碱性长石中的磷含量(0.18%~0.48%)。相较而言, 这些矿化伟晶岩常孤立出现, 具有稳定的产状和清晰的结构分带, 并且通常是矿区中规模较大的脉体。阿拉山地区的伟晶岩碱性长石普遍具有较低的 P_2O_5 含量($<0.1\%$), 与目前该区域尚未发现一定规模的稀有金属矿床事实相符。该区伟晶岩脉体通常发育三四个矿物结构带, 主要为文象结构带、块体微斜长石带和石英-白云母巢状带, 伴生一定数量的磷灰石、石榴子石和电气石。磷酸盐矿物的结晶很可能降低了碱性长石中磷的含量。因此, 这两个地区的伟晶岩稀有金属矿化潜力低于位于可可托海-哈拉额尔齐斯河上游的伟晶岩。

加曼哈巴-大喀拉苏成矿亚带中 30 条伟晶岩中, 无论贫瘠伟晶岩还是矿化伟晶岩, 碱性长石中 P_2O_5 含量普遍低于 0.10% (表 1)。该区矿化伟晶岩的 P_2O_5 含量也明显低于哈龙-青河成矿亚带中的矿化伟晶岩(表 3)。因此推断, 与哈龙-青河成矿亚带相比, 加曼哈巴-大喀拉苏成矿亚带中伟晶岩的稀有金属矿化潜力相对有限。如前文所述, 加曼哈巴-大喀拉苏成矿亚带所处的琼库尔结构单元含有一定量的幔源物质, 因此限制了沉积物源区中 Li 和 Be 的贡献以及岩浆中低的磷含量制约了岩浆的演化分异。但该区域中发育有含天河石和稀土磷酸盐矿物的 NYF 型伟晶岩, 因此, 对于宝石级天河石以及小型稀土矿床的形成具有一定潜力。

6 结论

(1) 贫瘠伟晶岩磷含量较低, 复杂矿化伟晶岩磷含量较高。针对绝大多数简单矿化和复杂矿化伟晶岩都显示了高磷特征($\text{P}_2\text{O}_5 > 0.10\%$), 结合前人提出的碱性长石富磷找矿指标, 本文认为碱性长石中 P_2O_5 含量高于 0.10% 可作为伟晶岩型稀有金属矿床的找矿指标。

(2) 二叠纪矿化伟晶岩较三叠纪矿化伟晶岩显示明显低的磷含量, 结合已有研究, 提出前者物源

中含有较多的幔源物质,加之其较低的侵位深度,限制了二叠纪伟晶岩的成矿潜力。

(3) 对加曼哈巴-大喀拉苏和青河-哈龙成矿亚带中伟晶岩碱性长石的 P_2O_5 含量对比研究显示,后者具有普遍较高的磷含量。由此提出青河-哈龙成矿亚带具有更大的稀有金属成矿潜力,其中的可可托海至喀拉额尔齐斯河上游一带是稀有金属找矿的重要靶区,该区域中分布的待评价高磷伟晶岩和未开采的简单矿化伟晶岩应作为未来勘查工作的重点对象。

参考文献(References):

- Bea F, Pereira M D, Corretgé L G, Fershtater G B. 1994. Differentiation of strongly peraluminous, perphosphorus granites: the pedrobernardo pluton, central Spain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(12): 2609–2627
- Broska I, Williams C T, Uher P, Konečný P, Leichmann J. 2004. The geochemistry of phosphorus in different granite suites of the Western Carpathians, Slovakia: The role of apatite and P-bearing feldspar. *Chemical Geology*, 205(1–2): 1–15
- Cai K D, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J, Long X P, Wu F Y. 2011a. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of peraluminous granites from the Chinese Altai, NW China. *Lithos*, 127(1–2): 261–281
- Cai K D, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J, Long X P, Wu F Y. 2011b. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U–Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 949–968
- Černý P. 1991. Rare-element granite pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. *Geoscience Canada Reprint Series*, 18(2): 49–67
- Černý P, Ercit T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43(6): 2005–2026
- Fryda J, Breiter K. 1995. Alkali feldspars as a main phosphorus reservoirs in rare-metal granites: Three examples from the Bohemian Massif (Czech Republic). *Terra Nova*, 7(3): 315–320
- Liu F, Zhang Z X, Li Q, Zhang C, Li C. 2014. New precise timing constraint for the Keketuohai No.3 pegmatite in Xinjiang, China, and identification of its parental pluton. *Ore Geology Reviews*, 56: 209–219
- Liu Y L, Zhang H, Tang Y, Zhang X, Lv Z H, Zhao J Y. 2017. Petrogenesis and tectonic setting of the Middle Permian A-type granites in Altai, Northwestern China: evidences from geochronological, geochemical, and Hf isotopic studies. *Geological Journal*, doi: 10.1002/gj.2910
- London D, Černý P, Loomis J L, Pan J J. 1990. Phosphorus in alkali feldspars of rare-element granitic pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, 28(4): 771–786
- London D. 1992. Phosphorus in S-type magmas: the P_2O_5 content of feldspars from peraluminous granites, pegmatites, and rhyolites. *American Mineralogist*, 77(1–2): 126–145
- London D, Morgan G B V I, Babb H A, Loomis J L. 1993. Behavior and effects of phosphorus in the system $Na_2O-K_2O-Al_2O_3-SiO_2-P_2O_5-H_2O$ at 200 MPa (H_2O). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(4): 450–465
- London D. 1998. Phosphorus-rich peraluminous granites. *Acta Universitatis Carolinae Geologica*, 42: 64–68
- Long X P, Sun M, Yuan C, Xiao W J, Cai K D. 2008. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution. *Sedimentary Geology*, 208(3–4): 88–100
- Long X P, Sun M, Yuan C, Xiao W J, Lin S F, Wu F Y, Xia X P, Cai K D. 2007. Detrital zircon age and Hf isotopic studies for metasedimentary rocks from the Chinese Altai: Implications for the Early Paleozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, TC5015, DOI: 10.1029/2007TC002128
- Long X P, Yuan C, Sun M, Xiao W J, Zhao G C, Wang Y J, Cai K D, Xia X P, Xie L W. 2010. Detrital zircon ages and Hf isotopes of the early Paleozoic Flysch sequence in the Chinese Altai, NW China: new constraints on depositional age, provenance and tectonic evolution. *Tectonophysics*, 480(1): 213–231
- Lv Z H, Zhang H, Tang Y, Guan S J. 2012. Petrogenesis and magmatic-hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No. 112 pegmatite in Altai, Northwestern China: Evidence from zircon U–Pb and Hf isotopes. *Lithos*, 154: 374–391
- MacDonald M A, Clarke D B. 1985. The petrology, geochemistry, and economic potential of the Musquodoboit batholith, Nova Scotia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22(11): 1633–1642
- Rao C, Wang R C, Hatert F, Gu X P, Ottolini L, Hu H, Dong C W, Dal B F, Baijot M. 2014. Strontiohurlbutite, $SrBe_2(P_2O_4)_2$, a new mineral from Nanping No. 31 pegmatite, Fujian Province, Southeastern China. *American Mineralogist*, 99(2–3): 494–499
- Rao C, Hatert F, Wang R C, Gu X P, Dal B F, Dong C W. 2015. Minjiangite, $BaBe_2(PO_4)_2$, a new mineral from Nanping No.31 pegmatite, Fujian Province, southeastern China. *Mineralogical Magazine*, 79(5): 1195–1202
- Raimbault L, Buroil L. 1998. The Richemont rhyolite dike, massif central, France: a subvolcanic equivalent of rare-metal granite. *The Canadian Mineralogist*, 36: 265–282
- Sun M, Yuan C, Xiao W J, Long X P, Xia X P, Zhao G C, Lin S F, Wu F Y, Kröner A. 2008. Zircon U–Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the early to middle Palaeozoic. *Chemical Geology*, 247(3–4): 352–383
- Tang Y, Zhang H, Su G Z. 2013. Phosphorus in alkali feldspars as an indicator for prospecting for pegmatite-type rare-metal ore deposits in Altai, NW China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 13(1): 3–10
- Wang T, Tong Y, Jahn B M, Zou T R, Wang Y B, Hong D W, Han B F. 2007. SHRIMP U–Pb Zircon geochronology of the Altai No.3 Pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2): 325–336
- Wang T, Jahn B M, Kovach V P, Tong Y, Hong D W, Han B F. 2009.

- Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 110 (1-4): 359-372
- Windley B F, Kröener A, Guo J H, Qu G S, Li Y Y, Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution. *Journal of Geology*, 110 (6): 719-737
- Yuan C, Sun M, Xiao W J, Li X H, Chen H L, Lin S F, Xia X P, Long X P. 2007. Accretionary orogenesis of the of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. *Chemical Geology*, 242(1-2): 22-39
- Zhang C, Liu L F, Santosh M, Luo Q, Zhang X. 2016b. Sediment recycling and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: evidence from Sr-Nd-Hf isotopes and trace elements in granitoids of the Chinese Altai. *Gondwana Research*, 47: 142-160
- Zhang J J, Wang T, Tong Y, Zhang Z C, Song P, Zhang L, Huang H, Guo L, Hou Z Q. 2017. Tracking deep ancient crustal components by xenocrystic/inherited zircons of Palaeozoic felsic igneous rocks from the Altai-East Junggar terrane and adjacent regions, western Central Asian Orogenic Belt and its tectonic significance. *International Geology Review*. DOI: 10.1080/00206814.2017.1308841
- Zhang X, Zhang H, Ma, Z L, Tang Y, Lv Z H, Zhao J Y, Liu Y L. 2016a. A new model for the granite-pegmatite genetic relationships in the Kaluan-Azubai-Qiongkuer pegmatite-related ore fields, the Chinese Altai. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124: 139-155
- Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, Wang C L, Sakyi P A. 2016. LA-ICP-MS U-Pb zircon, columbite-tantalite and ^{40}Ar - ^{39}Ar muscovite age constraints for the rare-element pegmatite dykes in the Altai orogenic belt, NW China. *Geological Magazine*, 1-22
- Zhu Y F, Zeng Y S, Gu L B. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No.3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altai Mountains, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(1): 61-77
- 陈剑锋. 2011. 阿尔泰 3 号伟晶岩脉缓倾斜部分岩浆的形成与演化. 硕士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1-87
- 黄永胜, 张辉, 吕正航, 唐勇, 唐宏. 2016. 新疆阿尔泰二叠纪-三叠纪伟晶岩侵位深度研究: 来自流体包裹体的指示. *矿物学报*, 36(4): 571-585
- 刘文政, 张辉, 唐红峰, 唐勇, 吕正航. 2015. 新疆阿斯喀尔特铍钼矿床中辉钼矿 Re-Os 定年及成因意义. *地球化学*, 44(2): 145-154
- 马占龙, 张辉, 唐勇, 吕正航, 张鑫, 赵景宇. 2015. 新疆卡鲁安矿区伟晶岩锆石 U-Pb 定年、钆同位素组成及其与哈龙花岗岩成因关系研究. *地球化学*, 44(1): 9-26
- 秦克章, 申茂德, 唐冬梅, 郭正林, 周起凤, 王春龙, 郭旭吉, 田野, 丁建刚. 2013. 阿尔泰造山带伟晶岩型稀有金属矿化类型与成岩成矿时代. *新疆地质*, 31(S1): 1-7
- 任宝琴, 张辉, 唐勇, 吕正航. 2011. 阿尔泰造山带伟晶岩年代学及其地质意义. *矿物学报*, 31(3): 587-596
- 唐勇, 张辉, 刘丛强. 2008a. 富磷过铝质岩浆岩的地球化学特征及成矿效应. *矿物岩石地球化学通报*, 27(S1): 145-146
- 唐勇, 张辉, 刘丛强, 饶冰. 2008b. 富 P 过铝质岩浆体系的研究现状及存在的问题. *矿物学报*, 28(1): 35-42
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京: 原子能出版社, 1-493
- 王涛, 童英, 李舫, 张建军, 史兴俊, 李锦轶, 韩宝福, 洪大卫. 2010. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义: 以中国阿尔泰为例. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 595-618
- 邹天人, 李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床. 北京: 地质出版社

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)