

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

科技述评

电气石对成岩成矿环境的示踪性 及应用条件

毛景文 王平安 王登红 毕承思

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京)



本文在系统查阅国内外文献的基础上, 结合对我国部分地区电气石的研究, 讨论了电气石在不同成岩成矿环境中的鉴别特征及应用条件。在以火山岩和以沉积岩为含矿岩石的块状硫化物矿床中, 电气石通常为富镁的镁电气石-黑电气石固溶体系列。在花岗岩、伟晶岩和细晶岩中, 电气石有镁电气石-黑电气石固溶体系列→黑电气石-锂电气石固溶体系列→锂电气石和镁电气石-黑电气石固溶体系列→黑电气石两个方向。此外, 还提出了应用电气石指示成岩成矿环境的一些限制因素。

关键词 电气石 成岩环境 成矿环境 示踪剂 钨-锡-铜矿床

1 引言

电气石是一种硼硅酸盐矿物。由于部分电气石具有鲜艳的颜色和形成硕大的晶体, 自古以来作为一种宝石或工艺材料受到人类的珍爱。地质学家最早注意到电气石类矿物通常产于酸性程度较高的花岗岩、伟晶岩和细晶岩中。由于该矿物的耐磨性, 也往往成为一种碎屑矿物出现于沉积岩内。直到近十多年来, 不少地质学家逐渐注意到电气石对于成岩、成矿环境有着重要的指示意义。本文通过对以往资料的阅读和整理, 结合在我国部分地区的研究, 试论述电气石的成岩、成矿示踪性以及应用过程中的一些条件。

2 电气石的基本特点

电气石的总结构式为 $XY_3Z_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4$ 。它有两个类型八面体场, 即 Z 场和一个稍微大一点但有些扭曲的 Y 场^[1,2]。一般来说, 铝占据 Z 场, 但往往不同程度地受到 Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ti, Mg, Cr 和 V^{3+} 的置换^[3-10]。较大的 Y 场容许强烈而广泛的单价、双价、三价和四价阳离子替代^[6,11-13]。X 场由 Na^+ 占据, 也可能有一些钙镁离子伴随, 或造成缺位^[14]。硼呈规则三次配位, 没有明显的替代。在四面体中一些铝可以代替硅。在羟基场内, F^- 或 O^{2-} 可以置换 OH^- 。D. J. Henry 和 C. V. Guidotti^[10]详细地总结了电气石中可能出现的原子(离子)或原子组合(离子组合)(表 1)。

注: 本文系国家自然科学基金资助项目(项目编号: 49273162)。
本文1992年2月收到, 11月改回, 季国容编辑。

表 1 电气石中重要的取代方式和交换组分

Table 1 Important substitutional schemes and exchange components in tourmaline

替 代 位 置	交 换 组 分
(1) $\text{Fe}^{2+}_y = \text{Mg}_y$	MgFe_{-1}
(2) $\text{Na}_x + \text{Al}_2 = \text{Ca}_x + \text{Mg}_2$ 钙镁电气石替代	$\text{CaMgNa}_{-1}\text{Al}_{-1}$
(3) $\text{Na}_x + \text{Al}_y = \text{Ca}_x + \text{Fe}^{2+}_y$	$\text{CaMgNa}_{-1}\text{Al}_{-1}$
(4) $\text{Na}_x + \text{Al}_y = \text{Mg}_x + \text{Fe}^{2+}_y$	$\text{Mg}_2\text{Na}_{-1}\text{Al}_{-1}$
(5) $\text{Na}_x + \text{Al}_y = \text{Ca}_x + \text{Li}_y$ 钙锂电气石替代	$\text{CaLiNa}_{-1}\text{Al}_{-1}$
(6) $\text{Mg}_y + \text{Si}_T = \text{Al}_y + \text{Al}_T$ 突尔马克替代	$\text{Al}_2\text{Mg}_{-1}\text{Si}_{-1}$
(7) $\text{Na}_x + \text{Mg}_y = \text{Al}_y + \square^{\frac{2}{3}}$ 无碱替代	$\text{AlNa}_{-1}\text{Mg}_{-1}$
(8) $\text{Mg}_y + \text{OH}^- = \text{Al}_y + \text{O}^{2-}$ 铝布格电气石替代	$\text{AlMg}_{-1}\text{H}_{-1}$
(9) $\text{Fe}^{2+}_y + \text{OH}^- = \text{Fe}^{3+} + \text{O}^{2-}$ 布格电气石替代	H_{-1}
(10) $\text{Al}_2 = (\text{Fe}^{2+}, \text{Cr}^{3+}, \text{V}^{3+})_2$	$\text{FeAl}_{-1}, \text{CrAl}_{-1}, \text{VAl}_{-1}$
(11) $\text{Mg}_y + 2\text{Si}_T = \text{Ti}_y + 2\text{Al}_T$	$\text{TiAl}_2\text{Mg}_{-1}\text{Si}_{-2}$
(12) $2\text{Fe}^{2+}_y = \text{Li}_y + \text{Al}_y$ 锂电气石替代	LiAlFe_{-2}
(13) $\text{OH}^{-1} = \text{F}^{-1}$	FOH_{-1}

注：1. 据 D. J. Henry 和 C. V. Guidotti^[10]

2. 下标 x 代表碱场，y 和 z 代表两个八面体场和 T 代表四面体场。

* 代表 x 场中的缺位

电气石是电气石簇矿物的一个总名称。它由 29 种同类结构矿物所组成^[15]。其中常见的有黑电气石 (schor 或 schorlite)、镁电气石 (dravite)、钙镁电气石 (uvite) 和锂电气石 (elkaite)。实际上，在自然界出现最多的是端元之间的固溶体系列。黑电气石-镁电气石和黑电气石-锂电气石是两组完全类质同象系列，而镁电气石与锂电气石之间显然是不混溶的^[16,17]。总之，正是由于结构复杂的离子替代和交换，电气石因环境的不同表现出成分的差异性。反之，这些差异性也正是追索成岩、成矿环境的指示。

3 电气石对成岩和成矿环境的“示踪性”

3.1 花岗质岩石中的电气石

电气石在自然界广泛发育，最多被提及的是作为副矿物呈浸染状分布于侵入体和少数喷出岩中。尤其是一种富硼的含锡花岗岩，电气石含量可达 5 % 或更高。这些电气石呈瘤状或串珠状分布于花岗岩体的隆起部位，例如桂北地区的平英、清明山、田蓬、元宝山和三防岩体^[18]。滇西的铁厂岩体、苕坝地岩体^[19,20]和广西大厂的龙箱盖岩体。有时，可以发现细长针状电气石呈包体分布于石英晶体中，例如，桂东北地区的双洞岩体。这些细针状电气石互相交叉构成网络。在美国 Connally 地区，花岗岩中的电气石可以分成几个世代^[21]。各世代电气石不仅表现为脉体的相互穿插，而且后期电气石沿早期电气石边部再生长大，或早期电气石被包裹在重结晶的石英晶体内。如果花岗岩体是富硼花岗岩，与之有关的伟晶岩、细晶岩以及云英岩也往往含有大量的电气

石。这类电气石呈瘤状、集合体或浸染状。在晶洞发育的脉体中,有时形成巨大的晶簇。

关于花岗质岩石中的电气石成分,诸多学者^[10,16,22]曾作过总结。即该类电气石属于黑电气石-锂电气石系列,以富铁为特征。通过对中国硼花岗质岩石的初步研究,可以认为黑电气石与锡或锡-钨花岗岩体有关。这些岩体曾经历过多阶段分异演化,电气石富集于晚阶段的岩体及有关的伟晶岩、细晶岩和云英岩中。而锂电气石或锂电气石-铁电气石过渡系列则与Li-Be-Nb-Ta花岗质岩石有关。从早阶段到晚阶段的岩体乃至与其相关的脉体,电气石锂的含量愈来愈高。张志兰^[23]的研究表明矿化伟晶岩形成有多阶段性。从早到晚,电气石种类由黑色电气石逐渐转变为锂电气石。尽管富硼花岗质岩石可以分为富锂和贫锂两个演化系列。然而,无论在哪个系列中,从早阶段到晚阶段岩浆演化直至伟晶岩、细晶岩和云英岩阶段,硅质、碱质、挥发组分和酸性不相容元素不断富集,Fe/Mg和Na/Ca值成倍增长。因而,在贫锂和富锂两个演化系列中必然有益于形成黑电气石和锂电气石。

3.2 共生矿床及热液沉积中的电气石

自70年代以来,地质学家们在研究块状硫化物过程中,逐渐认识到该类矿床中电气石的成分特征可以作为成岩成矿环境的指示剂。V. G. Ethier和F. A. Campbell^[24]首先在加拿大Sullivan铅-锌矿床中注意到大量电气石的存在,并指出这些电气石由海底喷气作用所生成。成分上属于黑电气石-镁电气石的过渡系列,且以富镁为特征。J. F. Slack^[25]总结了全球八个以沉积岩为容矿岩的块状硫化物矿床和六个以火山岩为容矿岩的块状硫化物矿床中电气石的分布和成分特点,指出“与块状硫化物有关的电气石是富镁的电气石,其主要成分和微量元素截然不同于深成岩中黑色富铁黑电气石”。同时,还在阿巴拉干地区的块状硫化物矿床中发现有块状具层纹构造的电英岩(tourmalinite)。为了区别于其它成因类型的电气石石英岩类,J. F. Slack^[25]将电英岩(tourmalinitite)定义为含电气石大于20%(体积)并赋予层控成因意义。尽管这一定义在R. V. Dietrich^[15]编著的“电气石簇”著作中未被采纳。后者描述电气石作为主要成分的岩石通常被称之为电英岩(tourmalinite)或者电气花岗岩(luxullianite),但似乎已被有关学者所接受。B. E. Taylor和J. F. Slack^[26]进一步详细地研究了阿巴拉干加里东期块状硫化物矿床中电气石的结构、化学成分和氧同位素,概括出富镁电气石的FeO/(FeO+MgO)平均为0.21,F/Cl值平均为33;含有较高铬、铜、铅、铋、和钒,贫锂、锰; $\delta^{18}\text{O}=9.5\text{‰}-15.5\text{‰}$;利用F/Cl对FeO/(FeO+MgO)清楚地区分块状硫化物中的电气石与花岗岩中的电气石。D. J. Henry和C. V. Guidotti^[10]基于以往文献资料及结合缅甸因州西北地区十字石级变泥岩中电气石的研究,在Al-Fe(全铁)-Mg和Ca-Fe(全铁)-Mg图解上确定了不同类型电气石的位置。该图解在以后的电气石成因研究文献中得到了广泛的采用。I. R. Plimer在研究澳大利亚Golden Dyke Dome矿床^[22]以及世界部分层状白钨矿矿床中电气石时,广泛对比了现代热水成矿作用,提出了电气石在块状硫化物矿床中的形成机制。以上几篇重要文献全面地推动了块状硫化物矿床和热水沉积岩中电气石及电英岩的研究,使其作为共生矿床成矿找矿的指示剂得到了普遍接受。迄今为止,该方面研究涉及到诸多类型金属矿床,除了块状贱金属硫化物矿床^[24-26,28-36]外,还有层状钨矿床和锡矿床及金矿床^[18,27,37-43]。另外一些研究讨论了指示同生成岩环境的电英岩和电气石^[10,39,45-47]。

尽管同生的电英岩及电气石被最晚鉴定出来,但其研究程度却相对成熟,其特征可以概括为五个方面:第一,虽然也有富含黑电气石端元的黑电气石-镁电气石过渡组分(例如,Bröcken, Hill等^[27]),但电气石总的以高镁为特征,FeO/(FeO+MgO)<0.5,基性组分的微量元素含量较高。第二,含矿岩系或围岩在一定程度上影响着电气石的成分。例如,钙镁电气石在碳酸盐层中比较常见,而在泥岩和粉砂岩中基本上为黑电气石-镁电气石固溶体系列。第三,电英岩具有

一系列典型的同生构造。例如,条带状构造、层纹状构造、交错层理、沉积韵律、软沉积滑动变形构造以及撕裂构造(vip-up)等。第四,在某些地区,与电英岩伴生有一些少见的热液沉积岩,例如,石英锰铝榴石岩(cotichule)和石英钠长石岩等。第五,个别电气石具有明显的光学和成分环带结构。电子探针分析表明,从中心到边部, $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 值增高, NaO/CaO 值降低。电气石边缘往往与相邻矿物,例如绿泥石边缘之间达到化学平衡被认为是流体成分与矿物边缘成分之间化学平衡的反映。D. J. Henry 和 C. V. Guidotti^[10], J. F. Slack 和 P. R. Coad^[33]将其论述为变质作用之前成岩的标志。

关于电英岩的成因,一般认为在海底或大陆裂陷槽内由热水沉积而成。在沉积作用进行期间,硼首先为一些粘土矿物,主要是伊利石所吸附。尔后,在成岩过程中再结晶为电气石及电英岩。然而,电英岩发育良好的层纹状构造和脱胶体构造^[41]也显示出直接由热水沉积的特点。

3.3 热液矿床中的电气石

现代成矿作用研究表明成矿热水溶液可有多种形成机制和来源。这里所讨论的热液矿床仅指与花岗岩岩浆活动有关的热液矿床。与同生矿床相比,热液矿床中的电气石研究程度较低。尽管地质学家们很早就注意到电气石是一些热液矿床中常见的脉石矿物^[21,48-52],遗憾的是有关电气石成分的资料却寥若晨星。

S. E. Swanson 等^[53]在研究阿拉斯加锡矿带中的电气石时,发现从花岗岩、云英岩到夕卡岩,电气石成分变化从黑电气石趋向钙镁电气石。其 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值分别为0.87—1.00, 0.59—0.69 和 0.39—0.47^[54]。对俄罗斯远东地区锡石硅酸盐矿床中电气石的穆斯堡尔谱分析结果表明,电气石的氧化度($\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$)随高度而变化。从标高—50m到300m,氧化度从0.17逐渐降低至0.09。这一结论为 Z. N. Rudakova^[55]在 Transbaikalian 的工作所印证。

在中国,电气石较多地发育于锡多金属矿床中。根据挥发组分不同,锡矿床可分为萤石黄玉型,电气石型及二者之间的过渡型,即兼含氟和硼矿物。电气石型锡矿床与富硼花岗岩有着密切的时空关系。该类矿床中的石英电气石脉^①(过去亦称电英岩脉)即为矿脉(例如,广西的宝坛、红岗、沙坪,云南的云龙和蒜坝地)。在宝坛地区,电气石属于黑电气石-镁电气石固溶体系列。18件电子探针分析表明 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 分布在0.68—0.85之间,平均0.79。在 $\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解中,其投影点分布于区内黑云母花岗岩中电气石与四堡期同生层纹状电英岩中电气石投影点之间(图1)。在柿竹园钨-锡-钼-铋矿床和曾家垅锡矿床中,挥发组分以氟为主,硼次之。电气石脉或石英电气石脉形成于矿化作用的晚阶段。电气石成分在很大程度上取决于围岩性质及脉体与花岗岩体的距离。曾家垅锡矿床内的石英电气石脉的围岩多为震旦系砂岩,其内电气石呈褐色,环带结构发育。六个电子探针分析资料表明该电气石的 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 值平均为0.93,为黑电气石类。柿竹园矿床中的电气石属黑电气石-镁电气石固溶体系列(图2),但分布范围较宽,而且与围岩成分紧密相关。当灰岩作为围岩时,电气石相对富有黑色电气石端元。当白云岩为围岩时,电气石趋向镁电气石。在内蒙古奥尤特陆相次火山岩型铜多金属矿床中,石英电英石脉的电气石为典型的黑电气石(图3)。而在同区内莲花山热液型铜矿中,电气石属于富铁黑电气石-镁电气石固溶体系列。电气石的 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 值与围岩成分息息相关(图3)。当闪长玢岩为围岩时,电气石富铁;当砂砾岩或英安质角砾岩为围岩时,电气石相对富镁。

从目前有限的资料可以看出,热液矿床中电气石多属于黑电气石,富铁黑电气石-镁电气石固溶体系列。其变化取决于围岩成分和脉体产出高度及与花岗岩体的空间关系。

3.4 蒸发-萨布哈环境中的电气石

① 为了区别同生电英岩(tourmalinite),兹将后生电英岩称之为石英电气石岩(quartz tourmaline rock)。

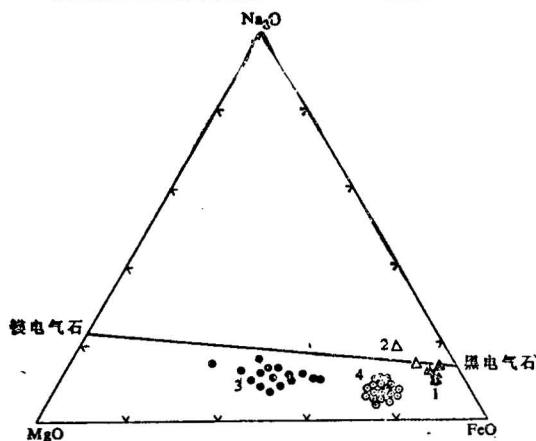


图 1 宝坛锡矿床中电气石的 $MgO-FeO-Na_2O$ 图解

Fig.1 $MgO-FeO-Na_2O$ triangle diagram of tourmalines in Baotan tin deposit

1—黑云母花岗岩中的电气石; 2—云英岩中的电气石; 3—层纹状电英岩中的电气石; 4—石英电气石脉的电气石

1—Tourmaline of biotite granite; 2—tourmaline of greisen; 3—Tourmaline of laminated tourmalinite; 4—tourmaline of quartz tourmaline vein

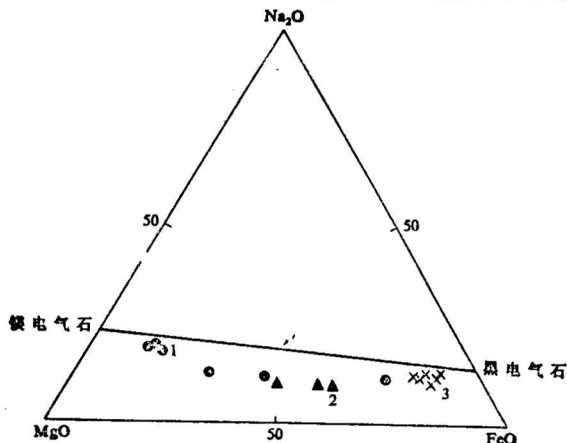


图 2 柿竹园 W-Sn-Mo-Bi 矿床和曾家垅 Sn-Cu 矿床中电气石的 $MgO-FeO-Na_2O$ 图解

Fig.2 $MgO-FeO-Na_2O$ triangle diagram of tourmalines in shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi and Zengjialong Sn-Cu deposit

1—柿竹园以白云岩为围岩的电气石; 2—柿竹园以碳酸盐岩为围岩的电气石; 3—曾家垅锡-铜矿床中的电气石
1—Tourmaline hosted by dolomite in Shizhuyuan mine; 2—tourmaline hosted by carbonate in Shizhuyuan mine; 3—tourmaline in Sn-Cu deposit of Zengjialong

在蒸发矿床中仅有微量的微晶自形电气石, 它们被认为直接从含硼海水中沉淀出^[56]。现代蒸发-萨布哈环境的成岩成矿作用研究发现^[24, 57, 58], 硼、钨、锂、镁等元素在盐湖中高度富集, 硼硅酸盐矿物、白钨矿、富镁酸盐矿物和富锂、铯矿物与伊利石等粘土矿物在湖底逐渐沉淀出。目前尽管尚未见到电气石的生成, 但经过成岩阶段, 电气石的形成也在所必然。在一些地区, 蒸发-萨布哈环境的地层层序中已发现电英岩(美国纽约州的Adirondacks^[59], 纳米比亚Damara造山带^[60]; 苏联的Azov^[61]; 阿富汗Sare Sang^[62])。在蒸发环境中形成的电气石亦属黑电气石-镁电气石过渡系列, 但镁电气石端元组分比较高。因此, 正如J. G. Raith^[41]所指出, “矿物成分不可能区分开喷气与蒸发-萨布哈环境中的电气石”。但应当指出, 两种环境具有显然不同的地质背景和地层层序。

3.5 变质岩和沉积岩中的电气石

电气石基本上出现于各类变质岩中。这就说明了电气石可以在范围较广的条件下形成, 而且在大多数变质作用条件下也比较稳定。迄今, 虽然某些变质岩中的电气石已被鉴定为变质前由同生成岩作用生成^[10], 但绝大多数电气石尚不能

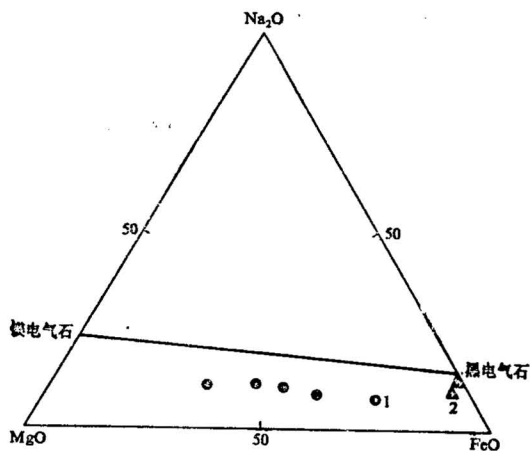


图 3 莲花山和奥尤特铜多金属矿床中电气石的 $MgO-FeO-Na_2O$ 图解

Fig.3 $MgO-FeO-Na_2O$ triangle diagram of tourmalines in Lianhuashan and Aoyoute polymetallic copper deposits

1—莲花山铜多金属矿床; 2—奥尤特铜多金属矿
1—Lianhuashan polymetallic copper deposit; 2—Aoyoute polymetallic copper deposit

确定为前变质、同变质或变质后的成因。

在表生风化作用中,由于耐磨和抗风化的特点,电气石往往作为重矿物或碎屑分布于各类沉积物或沉积岩中。电气石碎屑可以有不同的来源,其成分特征变化很大。例如,D. J. Henry和C. V. Gulddoti^[10]在缅甸因西北部十字石级变泥岩中发现有三种不同碎屑电气石。这些电气石呈核状被同压实成岩期的电气石所包围,二者之间呈明显的不连续性。所以,沉积岩中的电气石一般不指示成岩成矿环境,但有时可以有助于辨明原始来源物质的属性。

4 电气石作为示踪剂的条件

由上述讨论可知,电气石形成于各种不同的环境和地质体。其成分变化对环境指示有比较清楚的反映。但也存在一些特殊现象,尤其是成因不同的岩浆热液矿床与块状硫化物矿床中的电气石成分在一定范围的重叠,甚至有悖于一般规律。例如,I. R. Plimer和T. C. lees^[31]测试澳大利亚海底喷气型 Rosebery Zn-Pb-Cu-Ag-Au 矿床中电气石的 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{Mg})$ 值为0.72—0.88,平均0.83, $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 值为0.91—0.98,平均0.95,这种富铁贫镁多碱质的程度大于一般热液矿床中的电气石。I. R. Plimer^[27]还曾指出同生层纹状电英岩中电气石也可以是富黑电气石的种类,诸如南非的 Bushmanland 和澳大利亚六个元古代地体。相反,在我国秦岭地区, Li-Be-Na-Ta 伟晶岩脉中的电气石为黑电气石或/和锂电气石,但岩脉两侧蚀变岩中的电气石却为镁电气石。因此,在对电气石研究程度尚不够高的今天,应用电气石作为成岩成矿指示剂时必须结合其它因素综合考虑。注意从动态角度讨论电气石成分演变,找出适宜指示环境的可靠标志。

4.1 电气石成分在空间上的演变

电气石成分在空间上的演化往往更有效地反映成岩成矿作用。例如,在大厂锡多金属矿田中,黑云母花岗岩和矿体都含有比较多的电气石。岩体中的电气石无疑是黑电气石,而矿体中的电气石多为富镁的黑电气石-镁电气石固溶体系列。就成分而言,大厂矿体中电气石与沙利文(Sullivan)块状硫化物矿床中的电气石比较相似,但二者的成分在空间上的演化却迥然不同。在以 FeO 和 MgO 为座标的图解(图4)上,可以展示出沙利文铅-锌矿床和大厂锡多金属矿床中

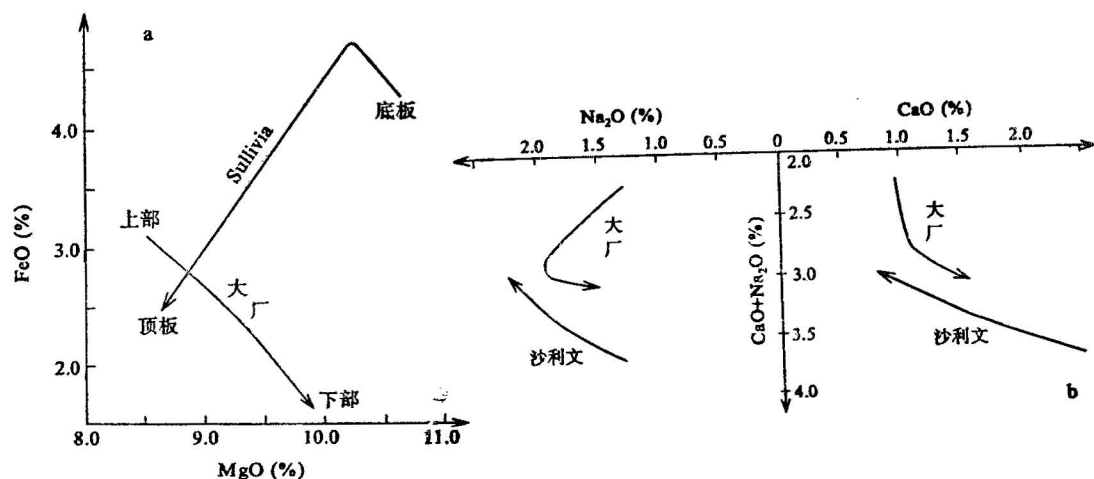


图4 大厂与Sullivan电气石Y位FeO-MgO替代(a)和X位CaO-Na₂O替代(b)在空间演化特点对比图
Fig. 4 Comparative diagram showing the evolutionary characteristics of the replacement of FeO to MgO in Y site(a) and CaO to Na₂O in X site(b) of tourmalines between Dachang polymetallic tin deposit and Sullivan base metal sulfide deposit

电气石成分的空间变化特点。即前者从下到上 FeO 和 MgO 含量同步减少, Al_2O_3 含量相反逐渐增高, 而后者主要表现为镁取代铁进入电气石晶格。它们分别映射出海底热水沉积环境和热液从岩浆房向外对富镁碳酸盐的连续交代过程。另外, 在大厂和沙利文矿区电气石 X 位的 CaO 与 Na_2O 的互相代替也反映出截然不同的演化方向。

4.2 电气石的复成性

某些地区电气石的形成可能经历过多次多阶段。只有严格区分各期次电气石及成分特点, 才有利于探讨成岩成矿的环境和条件。在 Kidd Creek 块状硫化物矿区, 电气石被鉴别为多阶段不连续的热溶液活动和变质事件的结果。各阶段电气石不仅显示出不同的颜色(绿色、褐色、蓝色和黄色), 而且同一个电气石晶体具有不连续的次生长大环带。电气石的成分变化从富铁镁电气石到接近黑电气石端元, 其 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值变化从 0.33—0.92。J. F. Slack 和 P. R. Co-ad^[33] 研究表明该矿床内电气石成分变化主要依赖于温度、pH 值、水/岩反应和参入的海水量。主要控制因素是高温富铁的热液与冷的富镁海水的混合作用。下盘电气石的 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 变化被认为在很大程度上反映出富镁海水的淋滤到热液体系的边缘及上部。相对于以沉积岩为含矿岩石的块状硫化物矿床, Kidd Creek 富铁电气石可能与火山环境附近初始热液流体有关。

此外, 一些学者鉴于富镁电气石作为海底喷气矿床成矿找矿标志的局限性, 提出了镁电气石、硅质岩和石膏层可为该类矿床的有效标志。

通过对桂北地区早元古代的层纹状电英岩和晚元古代电气石石英锡矿脉中电气石的研究发现, 两类电气石富镁程度虽然都不太高, 但有着明显的差别。前者比后者富镁, 在图 1 中显示出两个鲜明的投影点群。因此, 同一地区内电气石成分适宜直接指示成岩成矿环境。

5 结论

电气石化作为找矿标志由来已久, 对脉状锡多金属矿床和锂、铍、铌、钽矿床地质找矿有着重要意义。近十多年来, 对块状硫化物矿床中电气石的研究, 不仅证实了电气石是寻找该类矿床的重要标志, 而且对其生成环境也有较好的反映。

利用电气石成分在一定程度上可以区分开其不同的生成环境。与锡-钨多金属矿床和与锂、铍、铌、钽矿床有关的花岗岩、伟晶岩、细晶岩及云英岩分别含有黑电气石和锂电气石-黑电气石固溶体系列。块状硫化物矿床和蒸发-萨布哈盐类矿床中的电气石为镁电气石-黑电气石固溶体系列, 一般富镁。与花岗岩活动有关的矿床及夕卡岩中的电气石为黑电气石-镁电气石固溶体系列, 通常相对富铁; 偶尔也有黑电气石和镁电气石。

电气石的形成是一个多变量函数, 依赖于成岩成矿环境(例如, 岩浆演化体系、海水参与程度等)、温度、pH 值及围岩成分等。因此说, 使用电气石作为成岩成矿指示剂时, 最好在同一地区, 同一带内对比, 并与其它标志联合辨别。或者利用同一区内电气石的系统变化探讨成岩成矿过程。

总而言之, 电气石作为一种成岩成矿环境的指示剂是一门具有生命力的学科分支。可以认为通过对各类环境中电气石成分、微量元素和包括硼、氧同位素在内的稳定同位素的系统研究, 必将充实和推动该方面研究的全面展开。

本文在撰写过程中曾得到了廖英和龚羽飞的协助, 王骁红帮助清绘图件。笔者在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Donnay G, Barton R Jr. Refinement of the crystal structure of elbaite and the mechanism of tourmaline

- solid solution. *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 1972, 18: 273—286.
- 2 Rosenberg P E, Foit F F Jr. Synthesis and characterization of alkali-free tourmaline. *American Mineralogist*, 1979, 64: 180—186.
 - 3 Barton R Jr. Refinement of the crystal structure of buergerite and the absolute orientation of tourmalines. *Acta Crystallographica*, 1969, B25: 1524—1533.
 - 4 Tsang T, Thorpe A N. Magnetic susceptibility and triangular exchange coupling in tourmaline mineral group. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1971, 32: 1441—1448.
 - 5 Gorelikova N V, Perfilova Yu D, Bubeskin A M. Mossbauer data on distribution of Fe ions in tourmaline (translation). *International Geology Review*, 1976, 20: 982—990.
 - 6 Foit F F Jr, Rosenberg P E. The structure of vanadium-bearing tourmaline and its implications regarding tourmaline solid solutions. *American Mineralogist* 1979, 64: 788—798.
 - 7 Korovushkin V V, Kuzmin V I, Belov V F. Mossbauer studies of structural features in tourmaline of various genesis. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1979, 4: 209—220.
 - 8 Nuber B, Schmetzer K. Die Gitterposition des Cr^{3+} in turmalin. Strukturverfeinerung eines Cr-reichen Mg-Al-turmalins. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, 1979, 137: 184—197.
 - 9 Burns R G. The blackness of schorl: Fe^{2+} - Fe^{3+} electron delocalization in tourmaline. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1982, 63: 1142.
 - 10 Henry D J, Guidotti C V. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral; an example from the Staurolite-grade metapelites of NW Maine. *The American Mineralogist*, 1985, 70: 1—15.
 - 11 Frondel C, Biedl A, Ito J. New type of ferric iron tourmaline. *American Mineralogist*, 1966, 51: 1501—1505.
 - 12 Hermon E, Simkin D J, Donnay G. The distribution of Fe^{2+} and Fe^{3+} in iron-bearing tourmalines; a Mossbauer study. *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 1973, 19: 124—132.
 - 13 Fortier S, Donnay G. Schorl refinement showing composition dependence of the tourmaline structure. *Canadian Mineralogist*, 1975, 13: 173—177.
 - 14 Foit F F Jr, Rosenberg P E. Coupled substitutions in the tourmaline group. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1977, 62: 109—127.
 - 15 Dietrich R V. The Tourmaline Group. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985, 203—224.
 - 16 Deer W A, Howie R A, Zussman J. Rock-forming minerals. Vol. 1 Ortho and Ring Silicates 1962. London and New York. Longmans, Green and Co. Ltd, 300—319.
 - 17 Deer W A, Howie R A, Zussman J. Rock-forming minerals, Volume 1B, Disilicates and Ring Silicates. Second Edition, 1986, London and New York. Longman Scientific Technical. 559—602.
 - 18 毛景文, 宋叔和, 陈毓川. 桂北地区火成岩系列和锡多金属矿床成矿系列. 北京: 北京科学技术出版社, 1988. 92—95.
 - 19 施琳, 陈吉琛, 吴上龙, 彭兴阶, 唐尚鹤. 滇西锡矿带成矿规律. 北京: 地质出版社, 1989. 127—144.
 - 20 沈敢富. 电英岩的多成因论. 矿物岩石地球化学通讯, 1990, (2): 169—171.
 - 21 Charoy B. Tourmalinisation in Cornwall, England. In A. M. Evans (ed.) *Metallization Associated with Acid Magmatism* New York: Wiley Interscience. 1982. 63—70.
 - 22 Plimer I R. Tourmalinites from the Golden Dyke Dome, Northern Australia. *Mineralium Deposita*, 1986, 21: 263—270.
 - 23 张志兰. 秦岭伟晶岩中电气石化磁化率的研究. 矿物岩石, 1988, 8(1): 42—48.
 - 24 Ethier V G, Campbell F A. Tourmaline concentrations in Proterozoic sediments of the Southern Cordillera of Canada and their economic significance. *Canadian Journal of E. Science*, 1977, 14: 2348—2363.
 - 25 Slack J F. Tourmaline in Appalachian-Caledonian massive sulphide deposits and its exploration significance. *Institution of Mining and Metallurgy Transaction*, 1982, 91: 881—889.
 - 26 Taylor B F, Slack J F. Tourmalines from Appalachian-Caledonian massive sulfide deposits; textural, chemical, and isotopic relationships. *Econ. Geol.* 1984, 79: 1703—1726.
 - 27 Plimer I R. The association of tourmalinite with stratiform scheelite deposits. *Mineralium Deposita*, 1987, 22: 282—291.
 - 28 Slack J F, Taylor B E. Tourmalines associated with Appalachian massive sulfide deposits. *Geol. Soc. America Abstracts with Programs*, 1980, 12: 523.

- 29 Slack J F. Tourmaline-A prospecting guide for massive base-metal sulfide deposits in the Renobscot Bay area, Maine; Maine Geol. Survry, Spec. Econ. 1980, Studies Ser, 8, 25P.
- 30 Slack J F, Annis M P. Time-space relations of tourmaline-rich rocks at the Elizabeth mine and vicinity, Vermont copper belt. Abstr. Program Geol. Soc. Am, 1981, 13: 177.
- 31 Conklin N M, Slack J F. Trace-element analyses of tourmalines from Appalachian-Caledonian massive sulfides deposits; U. S. Geol. Survey Open-File Rept. 1983, 83—89.
- 32 Plimer I R, Lees T C. Tourmaline-rich rocks associated with the submarine hydrothermal Rosebery Zn-Pb-Cu-Ag-Au depossit and granites in Western Tasmania, Australia, Mineralogy and Petrology, 1988, 38: 81—103.
- 33 Slack J F, Coad P R. Multiple hydrothermal and metamorphic events in the Kidd Creek volcanogenic massive deposit, Timmins, Ontario: evidence from tourmalines and chlorites. Can. J. Earth. Sci. 26: 1989, 694—715.
- 34 孙海田, 葛朝华. 中条山层控铜矿条带状电气石岩及容矿富硼化学沉积岩系的发现及意义. 科学通报, 1988, (18): 1412—1415.
- 35 Benvenuti M, Lattanzi P, Tanelli G. Tourmalinite-associated Pb-Zn-Ag mineralization at Bottino, Apuane Alps, Haly; geologic setting mineral textures, and sulfide chemistry, Econ. Geol. 1989, 184: 1277—1292.
- 36 Benvenuti M, Costagliola P, Lattanzi P, Tanelli G. Mineral chemistry of tourmalines from the Bottino mining district, Apuane Alps (Haly). Eur. J. Mineral. 1991, 3: 537—548.
- 37 Plimer I R. Exhalative Sn and W deposits associated with mafic volcanism as precursnors to Sn and W deposits associated with granites. Mineralium Deposita, 1980, 15: 275—289.
- 38 Arribas-Rosado A. The significance of tourmaline in stratabond tungsten deposits in Spain Abstr. Gisements du Tungstene, 1986, Toulouse, 33.
- 39 Appel P W U. Stratiform tourmalinites in the Archean tungsten province of West Greenland. Mineralogy and Petrology, 1988, 39: 79—91.
- 40 David W B. Field, isotopic, and chemical studies of tourmaline-bearing rocks in the belt-Purcell Supergroup; genetic constraints and exploration significance for Sullivan-type ore deposits. Can. Earth Sci. 1988, 25: 392—402.
- 41 Raith J G. Tourmaline rocks associated with stratabound scheelite mineralization in the Austroalpine crystalline complex, Austria. Mineralogy and Petrology, 1988, 39: 265—288.
- 42 毛景文, 陈毓川, 陈晴助, 杨开秦. 中国桂北地区两类电英岩及其对成矿环境的指示. 岩石矿物学杂志, 1990, 9(4): 289—299.
- 43 McArdle F, Fitzell M, Osterom M G, O'connor P J, Kennan P S. Tourmalinite as a potential host rock for gold in the Caledonides of Southeast Ireland. Mineral. Deposita, 1989, 24: 154—159.
- 44 Brown C E, Ayuso R A. Significance of tourmaline-rich rocks in the Grenville complex of St. Lawrence County, New York, USGS Bulletin 1626c. 1985.
- 45 Appel P W U. Stratabound tourmaline in the Archean Malene supracrustals, West Greenland. Can. Jour. Earth. Sci. 1985 22: 1485—1491.
- 46 Bone Y. The geological setting of tourmalinite at Rum Jungle, N. T., Australia-genetic and economic implications. Mineral. Deposita, 1988, 23: 34—41.
- 47 Chown E H. Tourmalinites in the Aphebian Mistassini Group, Quebec. Can. J. Earth. Sci. 1987, 24: 826—829.
- 48 Simpson E S. Contributions to the mineralogy of Western Australia-Series VI. Journal of the Royal Society of Western Australia, 1931, 17: 137—148.
- 49 Sillitoe R H, Sawkins F J. Geologic, mineralogic and fluid inclusion studies relating to the origin of copper-bearing tourmaline breccia pipes, Chile. Econ. Geol., 1971, 70: 913—927.
- 50 Sillitoe R H, Halls C, Grant J N. Porphyry tin deposits in Bolivia. Econ. Geol., 1975, 70: 913—927.
- 51 Fletcher C J N. The geology, mineralization and alteration of ILK Wang mine, Rpeubiic of Korea. a Cu-W-bearing tourmaline breccia pipe. Econ. Geol. 1977, 72: 753—768.
- 52 Jackson N J, Halliday A. N, Sheppard S M F, Mitchell J G. 英格兰康沃尔 St. Just 矿区的热液活动. 国外矿床地质, 艾永德译, 1984, (29): 64—101.
- 53 Swanson S E, Newberry R J, Coulter G A, Dyehouse T. Mineralogical variation as a guide to the Petrogenesis of the tin granites and related skarns, Seward Peninsula, Alaska, Ore-bearing granite Systems; Petrogenesis

- and Mineralizing Process, Geological Society of America, Special Paper 246, 1990.
- 54 吴振寰.电气石及其在找矿勘探中的应用.国外成矿预测及其找矿方法,福州:福建科技出版社,1987,316—324.
 - 55 Rudakova Zh N. Quantitative relations of some elements in the cassiterite composition. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestvo*, 1972, 101, 317—322(Russian).
 - 56 Popov V S, Sadykov T S. Authigenic tourmaline from the Khodzha-Mumyn rock salt deposit. *Doklady Akademiyi Nauk USSR*, 1962, 145, 1121—1122(Russian).
 - 57 Smith G I. Subsurface stratigraphy and geochemistry of Late Quaternary evaporites, Searles Lake, California. *US Geol. Surv. Prof. Paper*, 1979, 1043, 1—130.
 - 58 郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元元. 青藏高原盐湖. 北京: 北京科学技术出版社, 1989. 192—270.
 - 59 Brown C E. Mineralization, mining and mineral resources in the Beaver Creek area of the Grenville lowlands in St. Lawrence country, New York. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1983, 1279, 21.
 - 60 Behr H J, Ahrendt H, Martin H, Porada H, Rohrs J, Weber K. Sedimentology and mineralogy of the Upper Proterozoic playa-lake deposits in the Damara Orogen. In: Martin, H., Eder FW(eds), *Intracontinental fold belts*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1983. 577—610.
 - 61 Serdyuchenko D P. Archean tourmaline-bearing and other metasedimentary gneisses of the Azov region as related to their paleogeographic environment of formation. *Akad. Nauk. USSR Doklady*. 1977. 227: 90—93 (Russian).
 - 62 Schreyer W, Abraham K. Three stage metamorphic history of a white schist from Sare Sang, Afghanistan, as a part of a former evaporite deposit. *Contr. Min. Petr.* 1976, 59: 111—130.

THE TRACER OF TOURMALINE FOR ROCK-FORMING AND METALLOGENIC ENVIRONMENTS AND ITS APPLIED CONDITIONS

Mao Jingwen, Wang Pingan, Wang Denghong and Bi Chengsi

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)

Abstract

The tracer of tourmaline for rock-forming and metallogenic environments has been studied for a short time, but a series of significant results have been achieved, especially in the study of syngenetic massive sulfide deposits. Based on previous data in conjunction with the study on several deposits, the diagnostic characteristics of tourmalines in different rock-forming and metallogenic environments and their applied conditions are systematically discussed in the paper. Tourmalines tend to be marked by Mg-enriched dravite-schorl solid-solution series in the massive sulfide deposits hosted in sedimentary rocks and volcanic rocks, and have two evolutionary trends, i. e. dravite-schorl solid solution series → schorl-elbaite solution series → elbaite and dravite-schorl solid solution series → schorl in granitoids, pegmatite and aplite. The microprobe analyses of tourmalines from the Baotan Sn-Cu deposit, Shizhuyuan W-Sn-Mo-Bi deposit, Zongjialong Sn-Cu deposit, Dachang polymetallic tin deposit, Lianhuashan copper deposit and Aoyoute copper deposit show that the tourmalines in hydrothermal deposits associated with granite are Fe-enriched schorl-dravite solid solution and/or schorl. The tourmaline composition shows reg-

ular changes outward from the contact zones of the granite intrusions. The changes depend on the chemical composition of the country rocks.

Key words: tourmaline, rock-forming environment, metallogenic environment, indicator

作者简介

毛景文, 1956年12月生。山西省运城市人, 1978年毕业于河北地质学院地质系, 1982年于中国地质科学院获硕士学位, 1988年获在职博士学位。现为中国地质科学院矿床地质研究所研究员。长期从事金属矿床及有关花岗岩演化研究工作。通讯地址: 北京市百万庄路26号, 邮政编码: 100037。