

## 成果与方法

## 国内外电气石研究进展

王敏<sup>1</sup>, 张尚坤<sup>1,2</sup>, 赵鹏大<sup>2</sup>

(1. 山东省地质科学实验研究院, 山东 济南 250013; 2 中国地质大学, 北京 100037)

**摘要:**电气石因其特殊的物理性质而被国内外学者广泛关注,并形成了大量的研究成果和应用专利。目前国内外对电气石的研究主要集中在晶体矿物学、找矿矿物学和岩石矿物学、晶体物理化学特性、矿床资源特征 4 个方面。自 20 世纪 40 年代以来,围绕电气石的晶体结构和电气石物理特性的内在动因等,中外学者做了大量深入细致的基础研究,并在利用电气石的化学成分判断成矿、成岩地质环境方面取得了许多宝贵的经验。近几年,国内外利用电气石的物理特性制造环保、保健产品等获得突破,展现了电气石的良好开发前景。

**关键词:**电气石;研究进展;前缘课题

**中图分类号:** P578 953 **文献标识码:** A

## 0 引言

电气石最早发现于斯里兰卡,当时被视为与钻石、红宝石一样珍贵的宝石。人们注意到这种宝石在受热情况下会带上电荷(即热电效应),因此得名电气石<sup>[1]</sup>。现在所说的电气石是指电气石族矿物的总称。

1703 年,荷兰人将电气石引入欧洲,并首先发现了电气石晶体对灰尘、草屑的吸附作用,故称其为“吸灰石”。1880 年法国的皮埃罗、里查兄弟证实了电气石具有热电性和压电性。1989 年日本学者 Kubo 发现电气石存在自发的永久电极,由此引发了对电气石开发研究的新热潮,目前世界上已形成各种相关专利 2000 余条。

## 1 国内外研究进展

国内外对电气石的研究主要集中在 4 个方面:

晶体矿物学的研究; 找矿矿物学和岩石矿物学研究; 晶体物理化学特性的研究及应用研究; 矿床资源特征研究。

## 1.1 电气石的晶体矿物学研究

电气石族矿物以其丰富的晶体形态、绚丽多姿

的晶体颜色、独特的晶体结构、复杂多样的化学成分、特殊的物理性质著称于世<sup>[2]</sup>。到目前为止,矿物学家已发现电气石族矿物 11 种(表 1)。这些电气石矿物化学成分复杂,以含硼为特征,有锂电气石、黑电气石和镁电气石 3 个端元组分。可形成锂电气石和黑电气石、黑电气石和镁电气石、锂电气石和钙锂电气石及镁电气石和钙镁电气石之间的连续固溶体系列。

不同种类的电气石其颜色、密度、硬度、折射率、多色性各有差别,一般富铁者呈黑色;富锂、锰、铯者呈粉红色;富镁者呈褐色、黄色;富铬者呈绿色。据刘国彬(1985)等对锂电气石各种亚种的致色原因研究发现,锂电气石的颜色差异主要是  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$  之间的电子跃迁引起的。折射率也随  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$  含量的增加而增大。已发现的电气石,其硬度多为 7,少数可达 7.5,密度差别较大,最小  $2.8 g/cm^3$ ,最大  $3.4 g/cm^3$ 。

对电气石晶体结构的研究最早始于 20 世纪 40 年代,至 50 年代达到顶峰,主要采用测定晶胞参数的方法对晶体结构进行分析。Belov, N. V (1949), G Donnay (1950), Ito (1951) 等先后对镁电气石、黑电气石和锂电气石的晶胞参数进行了测定。认为电气石的晶体结构为硅氧四面体  $[SiO_4]$  连接成的六方

收稿日期: 2006 - 12 - 26; 修订日期: 2007 - 04 - 13; 编辑: 孟舞平

作者简介: 王敏 (1968 - ), 女, 山东泰安人, 高级工程师, 主要从事地质矿产研究工作。

环  $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ , 1969 年 Barton 绘制了电气石矿物 (0001) 网面结构投影图<sup>[31]</sup>, 对电气石的晶体结构进行了形象概括。正是由于对电气石晶体结构系统分析的结果, 才使得人们对电气石复杂的化学成分有了相对合理的解释。目前, 国际公认的电气石晶体化学通式可表示为:  $\text{XY}_3\text{Z}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}\text{W}_4$ , 其中 X 位主要由 Na, K, Ca 或空缺占据, 在镁电气石中还可出现相当比例的  $\text{Mg}^{2+}$ ; Y 位由 Mg 和  $\text{Fe}^{2+}$ , (Al+Li) 或  $\text{Fe}^{3+}$  (还包括 Mn, Cr, V, Ti) 占据;  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  或  $\text{Cr}^{3+}$  则占据了 Z 位; B 为三次配位, 没有明显的替代; Si 位于四面体位置, 可由部分  $\text{Al}^{3+}$  替代  $\text{Si}^{[26]}$ ; W 位主要由 O, OH, F 组成。除此之外, Pehman 等在 20 世纪 60 年代对电气石的附加阴离子成分研究时, 还发现了  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Cl}^-$  的存在。随着对电气石族矿物复杂类质同象研究的深入, 有的科学家对电气石晶体化学通式的表示提出了新的见解, 如 Povondra (1981) 曾建议将电气石的化学通式表示为:  $\text{R}_1^{+x}(\text{R}_{2x}^{3+}\text{R}_{3-2x}^{2+})\text{R}_6^{3+}\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_{4-y}\text{O}_y$ 。B. A. 格列姆博茨基

(1985) 认为晶体类型的根本区别在于晶体的元素之间化学键不同。2005 年, 韩跃新等对内蒙古产黑电气石的化学键进行了分析计算, 结果表明: 电气石晶体结构中  $\text{M}^{n+}-\text{O}^{2-}$  键的键长、静电价强度、离子键成分、库仑力、相对键合强度、极性和键价之间具有极好的一致性。当晶体结构中阳离子半径较小、电荷较高时,  $\text{M}^{n+}-\text{O}^{2-}$  键的键长较短, 离子键的成分及极性相应较小。 $\text{M}^{n+}-\text{O}^{2-}$  键的静电价强度、库仑力、相对键合强度及键价较高时, 其键就较强, 反之亦然<sup>[4]</sup>。冀志江等 (2002) 通过差热分析、热处理和 X 射线衍射分析等手段对电气石在热处理过程中的物相转变进行研究发现: 850 时晶体结构的  $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$  复三方环和  $[\text{BO}_3]$  三角结构已开始破坏, 890 时出现新的物相——莫来石, 1010 出现矽线石。而汤云晖等的研究结果则与此略有区别, 她认为 900 以下电气石保持稳定, 900~950 电气石分解。

表 1 电气石族主要矿物

矿物名称	理想化学式	常见晶形	主要颜色
布格电气石	$\text{NaFe}_3^+\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{30}\text{F}$	棱柱状	古铜色、褐色
铬镁电气石	$\text{NaMg}_3(\text{Cr}_3\text{Al})\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$	棱柱状	暗绿色、近黑色
镁电气石	$\text{NaMg}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH}, \text{F})_4$	等轴状	褐色、浅绿黑色
锂电气石	$\text{Na}(\text{Al}, \text{Li})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_4$	棱柱状	鲜绿色、粉红色
铁镁电气石	$(\text{Na}, \text{K})(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Fe}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_4$	等轴状和短柱状	黑色、褐色
钙锂电气石	$\text{Ca}(\text{Li}, \text{Al})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_4$	棱柱状	绿色、粉红色
黑电气石	$\text{NaFe}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})$	棱柱状和等轴状	黑色、黄色
钙镁电气石	$\text{CaMg}_3(\text{Li}_3, \text{Mg})\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH}, \text{F})_4$	等轴状	黑褐到黑色
铁钙电气石	$\text{CaFe}_3(\text{Li}, \text{Mg})_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$	等轴状	黑褐色
无碱铁电气石	$\text{Fe}_2^+(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$	柱状	浅蓝黑色、蓝色
无碱锂电气石	$(\text{Li}, \text{Al}_2)\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$	柱状	浅粉红色

注: 根据林善圆等, 2004 年。

### 1.2 找矿矿物学和岩石矿物学研究

电气石广泛分布于火成岩、沉积岩、变质岩和热液矿床中, 其矿物种类、化学组成、放射性同位素等随形成环境不同而不同, 而且电气石的化学性质稳定, 耐磨、耐蚀, 有利于保持原有形态, 便于鉴别研究。所以自 20 世纪 60 年代末, 便陆续有人将电气石作为判断岩石成因、沉积环境、找矿及指代的标型矿物加以研究了。

1985 年, Henry 等设计了 2 个电气石化学成分

三角形图解, 用于判别 12 类不同的成岩环境 (图 1)。Pirajno et al (1992) 和 Hellingwerf et al (1994) 的研究成果表明, 电气石的  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$  比值变化还可用于判别和指示热液矿床的存在和大小。

电气石中微量元素的含量能够反映源岩或矿床中这些元素的富集程度<sup>[5]</sup>, 是 Au, W, Sn, Co, Pb, Zn, Cu 等矿床的指矿元素。Jiang 等 (1999) 在研究了中国大厂锡多金属矿床中发育的 2 种不同成因类型电气石的微量元素特征发现: 与花岗岩有关的脉状电

电气石较与矿体共生的层纹状电气石,其 Li, Mn, Co, Zn, Sr, Ba 的含量较高,而 Sn, Cs, Sc, V 的含量较低。而且 2 类电气石具有完全不同的 U - Th 和 Zr - Hf 元素分布模型,脉状电气石的 U/Th 比值为 9.1, Zr/Hf 比值为 19.4,层纹状电气石的 U/Th 比值为 1.1, Zr/Hf 比值为 37.2,显然二者差别较大。张长生等认为层纹状电气石岩属火山喷气—沉积变质成因,形成于海底火山喷气—沉积构造环境中,其原岩是

一套富硼镁的泥铁质硅质岩石。这些层状沉积物富含 Au, W, Sn, Co, Pb, Zn, Cu, Ag, Mn, B, F, Cl 等造矿元素和矿化剂元素,是良好的矿源层<sup>[6]</sup>,它们对寻找硫化物矿床具有重要的地质意义。加拿大的苏利文 Pb - Zn - Ag 矿床、中条山胡蓖型铜矿、内蒙古别鲁乌图铜矿、辽宁元古宙地体中都存在这种层状电气石岩。

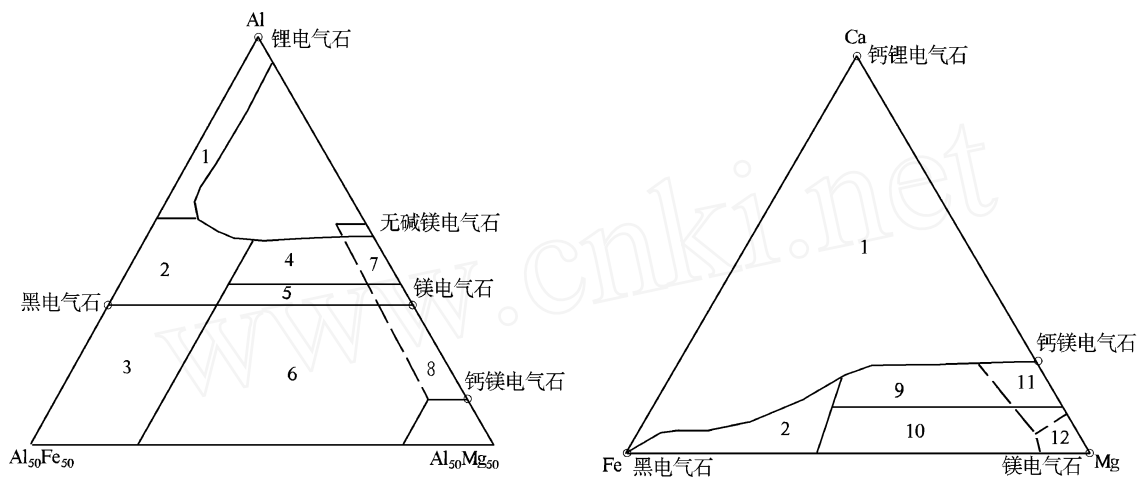


图 1 电气石化学成分与成岩环境关系判别图

图中 1 区和 2 区分别代表富 Li 和贫 Li 的花岗岩、细晶岩; 3 区代表富 Fe<sup>3+</sup> 的石英—电气石岩 (热液蚀变花岗岩); 4 区和 5 区分别代表含 Al 饱和矿物和不含 Al 饱和矿物的变质泥质岩; 6 区代表富 Fe<sup>3+</sup> 石英—电气石岩、钙硅质和变质沉积岩; 7 区代表贫 Ca 的变质超镁铁质岩和富 Cr, V 的变质沉积岩; 8 区代表变质碳酸盐岩和变质辉石岩; 9 区代表富 Ca 的变质泥岩、砂岩和钙硅酸盐; 10 区代表贫 Ca 的变质泥岩、砂岩和石英—电气石岩; 11 区代表变质碳酸盐岩; 12 区代表变质镁铁质岩 (资料据 Henry et al, 1985 年)

电气石的稀土元素含量及配分能较灵敏地指示成岩、成矿环境,推断热液来源、成分和演化情况<sup>[5]</sup>。Jolliff 等 (1987)、Roda 等 (1995) 对西班牙撒拉曼卡地区伟晶岩及其围岩中电气石的稀土分析表明,其稀土配分受矿物共生组合和周围岩石环境强烈控制。伟晶岩中的电气石稀土配分呈高度分异型,而围岩中电气石的稀土配分呈中等分异型。

对电气石稳定同位素的研究始于 20 世纪 80 年代末,主要针对 H, O, B, Si 4 种元素开展工作的。先后形成了一批具有重要意义的成果。对电气石 - 水体系 H, O 同位素分馏系数的实验测定和理论计算,使得电气石的 H, O 同位素组成能直接用于计算成岩成矿热液流体的同位素组成,推断水的来源,也可以估算形成温度。对电气石的 B 同位素研究近年也有了长足进展,它不但可以判明成岩成矿体系

中 B 的来源,有助于解决岩石和矿床的成因问题,而且可用于研究热液体系中水 - 岩相互作用,温度变化、海水混染或不同热液混合过程及后期变质和热液改造事件。目前电气石的 B 同位素测定已被广泛用于研究花岗岩、伟晶岩和各类热液矿床中,特别是硫化物矿床中。不同成因类型电气石的 <sup>11</sup>B 数值范围各不相同 (图 2, 资料据 Jiang, 1999 年)。对 Si 同位素的研究相对较少。Jiang et al 于 1994 年对加拿大的苏利文 Pb - Zn - Ag 矿床中电气石岩的 Si 同位素进行了研究,数据表明它们与现代和古代海底喷气热液沉积硅质岩的 Si 同位素组成一致。

电气石的 Rb - Sr, Sm - Nd 和 K - Ar 同位素研究既可以用于“示踪”,也可以测年。它在判明成矿物质来源,推测源区岩石和矿床成因及确定形成年代等方面已有许多成功先例。研究表明,电气石具

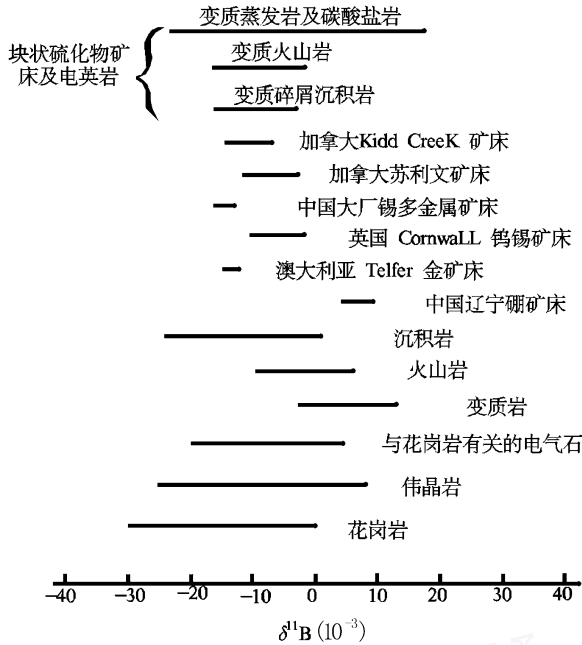


图 2 各类型电气石的  $^{11}\text{B}$  值变化曲线

有低 Rb、高 Sr 的特征,因此它的 Sr 同位素能较好地代表原始热液的同位素组成。Jiang et al (1999) 对大厂锡多金属矿床中电气石的 Sr 同位素研究表明,层纹状电气石  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.713 ~ 0.718,脉状电气石  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.712 ~ 0.721,二者具较明显差异,说明它们的成因不同。由于不同类型电气石稀土配分模式不同,因此利用电气石的 Sm - Nd 同位素组成,既可以示踪物质来源和形成环境,又可以提供电气石形成时的年龄。蒋少涌等对大厂锡多金属矿床中层纹状电气石和脉状电气石的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  进行了测试,得出了与 Sr 同位素测试结果相同的结论。对电气石 Pb 同位素的研究目前开展较少, Frei 等 (1996) 对津巴布韦太古宙金矿中电气石和磁黄铁矿的 Pb 同位素研究发现,电气石的 Pb - Pb 等时线年龄比磁黄铁矿的 K - Ar 老的多。对电气石 K - Ar 年龄的研究与 Pb - Pb 年龄研究类似,在解释上仍存在较大分歧。如:希腊某地花岗岩和伟晶岩中电气石年龄比白云母的 K - Ar 和 Rb - Sr 年龄均老。Altherr 等 (1982) 认为,电气石较老的年龄是由于电气石形成时晶格中捕获了过剩的放射性成因 Ar 的缘故。而 Andriessen 等 (1991) 却认为,电气石年龄之所以比白云母老,是因为电气石对 K - Ar 体系的封闭温度高于白云母,这一现象正是记录了岩体的冷却历史。

### 1.3 晶体物理化学特性的研究及应用研究

众所周知,电气石具有热电性和压电性。它最早由荷兰人发现,1824 年, Brewster D. 发表文章对这一现象进行了论述,1880 年法国的皮埃罗、里查兄弟进一步证实了电气石的热电性和压电性。之后又有多位学者对这一特性做了深入研究,并将这一特性用于红外光谱探测仪和热成像仪器上。Donnay (1972) 认为电气石的热电效应和压电效应主要是由于位于晶体结构中心、3 个八面体共有的 O 的不对称、非简谐振动引起的。所以,具有晶格缺陷或杂质多的电气石的电性更强。20 世纪 80 年代末,日本学者 T. Kubo 利用离子吸附实验,间接证明了电气石晶体自发电极性的存在,从而为电气石作为工业矿物,尤其在环境与健康领域的应用开辟出崭新的途径<sup>[7]</sup>。2002 年,冀志江等采用扫描电镜和电子探针电子束轰击成像的办法直接观察到了电气石颗粒的静电吸引与排斥、电偶极的存在。丁燕等 (2004) 则通过研究电气石微粒的自迁移现象,进一步探讨了电气石自发极化效应产生的原因和机理,并提出了通过测量自迁移距离评价电气石电极性强弱的新方法。研究表明,电气石存在的自发电极也与其晶体结构有关。构成  $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$  复三方环的 6 个硅氧四面体,角顶指向同一方向,而且  $[\text{Y} - \text{O}_5(\text{OH})]$  八面体和连接结构岛的  $\text{Al} - \text{O}_5(\text{OH})$  八面体存在明显的晶格扭曲,2 种八面体晶格扭曲导致晶体结构稳定性降低,直接作用于  $(\text{BO}_3)_3$  三角,在  $(\text{SiO}_3)_6$  四面体六角环单向性作用下,引起  $(\text{BO}_3)_3$  三角中 B 原子从三角平面向 c 轴反方向位移,导致自发极化。自发极化效应表现为电气石周围静电场的存在。据 Voigt 给出的极化值计算,电气石的静电场强度可达  $6 \times 10^6 \text{ V/m}$ ,随着远离质点中心静电场强度迅速减弱。2002 年,杨如增等对黑色电气石研究发现,由于电气石复杂的晶体结构与丰富的类质同象替代等原因引起的晶格缺陷,可使电气石辐射  $8 \sim 25 \mu\text{m}$  波长的红外线,是天然的强红外辐射材料<sup>[8]</sup>。

正是由于对电气石热电效应、压电效应、极电效应、红外辐射效应的深刻认识,使得对电气石相关产品的开发日新月异,目前已形成相关专利 2000 余条。现在国内外电气石相关产品的开发主要集中在纺织行业的纤维制造、用于水处理的陶瓷球、环境保护的涂料与涂层材料和家具、人体保健、新科技等方

面。例如:日本的专利已经把树脂包覆过后的电气石粉用于造纸、纺织、纤维制造等领域;利用电气石自身能发射红外线的特点,给 SiC 粉体进行镀层,充分展现半导体的魅力;把电气石添加到化妆品中,可以防止综合过敏症;把电气石粉体做成电气石球,可以净化水中的污染和降低水的硬度,增加水的活性,更利于人体吸收,调节人体内的环境;利用电气石的特性来制造刮水片;电气石微粉用于烟草中,能够减少烟草本身燃烧时所产生的有害物质并将其转化为无害物质,同时它本身的红外辐射性能则对人体健康具有不可低估的作用。近几年的研究还发现,电气石释放的负氧离子浓度较高,相当于海滨、瀑布、森林的负氧离子浓度,被誉为“大气长寿素”<sup>[9]</sup>。刘春雨认为负离子产生的根本原因在于电气石的热电效应和压电效应,微小的温压变化,即可引起电气石晶体间高达 100 万电子伏特的电势差,它使附近的空气发生电离,被击中的电子脱离原子核的束缚,附着于邻近的水和氧气分子并使之成为空气负离子。电气石粉体的粒度、周围环境的压力、湿度等对电气石负离子释放能力的影响最大。当然,由于受电气石自身的颜色、粒度、品质等影响,直接利用不宜把握产品质量,需对电气石进一步加工。这方面的研究主要包括矿石提纯、超细加工和表面改性等。

#### 1.4 矿床资源特征研究

电气石最早是作为宝玉石原料加以开采利用的,被称为碧玺,距今已有数千年的历史。根据颜色和成分的差异,碧玺可分为无色碧玺、红碧玺、绿碧玺、黄碧玺、黑碧玺、猫眼碧玺等多个品种。肉眼看,部分绿碧玺常与祖母绿混淆,江富建(2002)利用折射仪、红外光谱等手段,确定该类碧玺属钙镁电气石系列。陈武等认为碧玺之所以多姿多彩,与电气石间的类质同象有关。1993 年,张学凯对云南省的碧玺产地和碧玺特征进行了论述。2001 年, C 6aMe - ndes, J 等介绍了巴西的电气石和海蓝宝石矿床特征。而对于非宝石类的电气石目前很少作为矿产资源进行研究,据李赋屏等估算,我国这类电气石的资源量在数千万吨以上,分布于云南、广西、新疆、辽宁、山东、内蒙古等 25 个省、市、自治区<sup>[10]</sup>。根据产出特征,原生电气石可分为伟晶岩成因、变质热液交代成因和热液充填成因,也有专家归结为岩浆

作用成因和热水沉积成因<sup>[3]</sup>。

## 2 电气石研究亟待解决的前缘课题

(1)对电气石晶体结构、晶体化学组成、晶体特性的研究已相当深入,但缺乏关于晶体缺陷和晶体化学成分对晶体特性的影响研究。

(2)对非宝石类电气石,作为成矿成岩示踪剂的研究已取得大量成果,但至今很少有学者将其作为矿产资源进行研究,以至对电气石的产出背景、地球化学特征、成因等还不完全清楚。

(3)对电气石的应用研究,成果丰富,但缺少关于电气石产出地质背景对电气石晶格缺陷的影响研究,缺少关于不同成因类型对电气石特性及其应用效果影响的研究。

(4)目前对电气石的应用主要利用其天然形成的物理特性,缺乏对电气石人工改性研究。

## 参考文献:

- [1] 黄云龙,郑水林,李杨,常新安. 电气石的加工应用现状及发展前景 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2003, (4): 18 - 21.
- [2] 林善国,蔡克勤,蔡秀华,等. 电气石族矿物学研究的新进展 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2005, (1): 20 - 23.
- [3] BARTON R J. Refinement of the crystal structure of buergerite and the absolute orientation of tourmaline [J]. Acta Crystallographica, 1969, (25): 1524 - 1533.
- [4] 韩月新,任飞,印万忠,等. 电气石晶体结构中的化学键的计算 [J]. 有色矿冶, 2005, 21 (1): 12 - 14.
- [5] Ethier V G, Campbell F A. 1977. Tourmaline concentrations in Proterozoic sediments of the south Cordillera of Canada and their economic significance. Canadian Journal of Earth Sciences, (14): 2348 - 2363.
- [6] 张长生,刘劲鸿. 桦甸夹皮沟层状电气石岩特征及其他地质找矿意义 [J]. 吉林地质, 2003, 22 (4): 11 - 18.
- [7] 张志湘,冯安生,郭珍旭. 电气石的自发极化效应在环境与健康领域的应用 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2003, (1): 47 - 49.
- [8] 杨如增,徐季新,廖宗廷. 黑色电气石红外辐射与晶格缺陷及粒径的关系 [J]. 同济大学学报, 2002, 30 (12): 61 - 64.
- [9] 姚鼎山. 环保与健康新材料——托玛琳 [M]. 上海:中国纺织大学出版社, 2001, 44 - 63.
- [10] 李赋屏,彭光菊,卢宗柳,等. 我国电气石资源分布、地质特征及其开发利用前景分析 [J]. 矿产与地质, 2004, 18 (5): 493 - 497.

(下转第 23 页)

发试验曲线是一致的。很显然,莱州湾沿岸地下卤水具备蒸发生卤的特征,这与地球化学模拟方法得出的结论是一致的<sup>[5]</sup>。

另外,从地质的角度来看,冰冻生卤都有与之相应的地质地貌形态出现,其埋深可达几百到几千米。而莱州湾沿岸浅层地下卤水的埋藏深度仅为 0~80m,且呈有规律的带状分布,显然不同于冰冻生卤的地质构造。因此可以得出莱州湾沿岸地下卤水是蒸发浓缩形成,而非来自冰冻成卤的结论。

### 参考文献:

- [1] 韩有松,吴洪发. 莱州湾滨海平原地下卤水成因初探[J]. 地质评论, 1982, 28(2): 126 - 131.
- [2] 韩有松,孟广兰,王少青,等. 中国北方沿海第四纪地下卤水[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 1 - 193.
- [3] 孟广兰,王珍岩,王少青,等. 冰冻成因卤水的水化学标志 I

- 卤水的 D 值[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(4): 416 - 420.
- [4] Wang Y Q, Chen X B, Meng G L, et al. On changing trends of D during seawater freezing and evaporation[J]. Cold Regions Science and Technology. 2000, (31): 27 - 31.
- [5] 王珍岩,孟广兰,王少青. 渤海莱州湾沿岸第四纪地下卤水演化的地球化学模拟[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 49 - 53.
- [6] 康兴伦,程作联. 山东渤海沿岸地下卤水的成分研究[J]. 海洋通报, 1990, 9(6): 17 - 21.
- [7] Herut B, Starinsky A, Katz A, et al. The role of seawater freezing in the formation of subsurface brines[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, (54): 13 - 21.
- [8] McCaffrey M A, Lazar B, Holland H D. The evaporation path of sea water and the coprecipitation of Br<sup>-</sup> and K<sup>+</sup> with halite[J]. J. Sediment Petrol, 1987, (57): 928 - 937.
- [9] Nelson K H, Thompson T G. Deposition of salts from sea water by frigid concentration[J]. J. Mar Res, 1954, (13): 166 - 182.

## Latest Origin Basis of Underground Bittern Evaporation in Costal Areas of Laizhouwan Gulf

L I Wei, WU Yan - hua,

(No. 4 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Weifang 261021, China)

**Abstract:** Costal areas in Laizhouwan gulf in Shandong province is an important natural bittern source in China. In these areas, bittern resource distributes widely with high density and big reserve. Through study in decades, origin of natural bittern can be divided into two types: one is evaporation and concentration, the other is deep freezing. On the basis of sea water evaporating and freezing experiment, combining with the result of variation trend of Na/Cl and Ca/Mg ratios, it is regarded that natural bittern in Laizhouwan gulf is formed by evaporation and concentration function.

**Key words:** Natural bittern resource; origin; basis; evaporation and concentration; costal areas of Laizhouwan gulf

(上接第 20 页)

## Development of the Study on Toumaline in Our Country and Abroad

WANG M in<sup>1</sup>, ZHANG Shang - kun<sup>1,2</sup>, ZHAO Peng - da<sup>2</sup>

(1. Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Shandong Jinan 250013, China; 2. China Geological University, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Crystal mineralogy, Ore - prospecting mineralogy, crystal physical and chemical characteristics and deposit resource are major aspects in studying toumaline in our country and abroad. Crystal structure and physical property of toumaline are studied in detail, and precious experiences in determining geological environment of ore - forming and rock - forming by using chemical compositions of toumaline have been gained from 40th of 20 century. Environment protection and Health products are produced by using physical property of toumaline, which shows a good exploration future of toumaline.

**Key words:** Toumaline; study development; advanced topic