

福建南平花岗伟晶岩中的电气石研究

杨岳清, 王 勇, 吕庆田, 赵金花

(中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 电气石是南平伟晶岩和围岩中分布广泛的一种副矿物, 根据化学成分, 它们属于镁铁锂电气石亚族, 其端员为铁(黑)电气石、镁电气石和锂电气石, 其间还有一系列过渡矿物。南平伟晶岩中除未发现端员锂电气石外, 其他端员及过渡系列电气石均十分发育, 这在国内外同类伟晶岩中十分少见。不同成分电气石分布于不同类型伟晶岩及同一伟晶岩分异演化的不同阶段。本文在对电气石的化学成分、物理性质、产状等较详阐述基础上, 对它们的演变规律及形成环境进行了讨论, 这对于探讨南平伟晶岩的形成及寻找稀有金属伟晶岩有重要意义。

关键词: 电气石; 花岗伟晶岩; 分异演化; 福建南平

中图分类号: P578.953; P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)03-0235-08

Characteristics of tourmalines from Nanping granitic pegmatites in Fujian Province

YANG Yue-qing, WANG Yong, LÜ Qing-tian and ZHAO Jin-hua

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: Tourmaline is a kind of accessory mineral widely distributed in acidic igneous rocks and metasomatites, and the most widely distributed Fe-Mg-Li tourmaline includes several end members like dravite, schorl and elbaite as well as a series of transitional minerals. In the same area, the same rock is often characterized by the development of the same type of tourmaline. Nevertheless, the end members and transitional minerals are well developed in Nanping pegmatite and altered wall rocks, except for elbaite. Such a phenomenon is very rarely observed in the same type of granitic pegmatites both in China and abroad. In Nanping, tourmalines with different components are distributed in different types of granitic pegmatites and different differentiation evolution stage of the pegmatite. The schorl (Fe tourmaline) is widely distributed in the four types of pegmatites as well as their altered wall rocks. In the rare metal mineralized pegmatite, the tourmaline can be divided into two types, i. e., the middle member of the Fe-Li series (Li-Fe tourmaline) and the members of the Mg-Fe series comprising dravite and Mg-Fe tourmaline. The two types of tourmalines are apparently different in the formation age and the paragenetic association of minerals. Based on detailed descriptions of physical-optical characteristics, chemical components, X-ray powder diffractions, infrared absorption spectra and thermal spectra of tourmalines from Nanping pegmatites, this paper discusses the evolution regularity and formation environment of these tourmalines. The schorl in Type I pegmatite was formed under the conditions of upper hydraulic pressure, low content of rare elements and absolute domination of crystallization. In contrast, the schorl in Type II-III pegmatites was formed in a relatively low depth suggesting the beginning of the transformation to the open system, with rare elements concentrated in the pegmatite melt-solution in such an environment. The Li-Fe tourmaline in Type

收稿日期: 2009-07-15; 修订日期: 2009-12-10

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAB01B01)

作者简介: 杨岳清(1941-), 男, 研究员, 主要从事矿床地质、矿物和地球化学研究工作, E-mail: yangyueqing0@sina.com

IV pegmatite was formed in a relatively open system with wide metasomatism, with its formation depth apparently shallower than that of Type I-III pegmatites. In such a formation environment, elements such as Li, Rb, Cs, Nb, Ta and Sn are highly concentrated in the pegmatite melt-solution. The formation environment of dravite in Type IV pegmatite was no longer belonging to endogenic pegmatite mineralization, but this mineral inherited some characteristics of Li-Fe tourmalines in Type IV pegmatite in content of elements such as Li. Its modes of occurrence are very rarely seen in pegmatite areas both in China and abroad. The formation sequence of tourmalines in Nanping pegmatites and wall rocks is on the whole in order of black Fe-tourmaline→yellowish green Li-Fe tourmaline→yellowish brown Mg-Fe tourmaline→grayish blue dravite. This sequence will surely play an important indicating role in researches on the formation environment and evolution of the Nanping pegmatite

Key words: tourmaline; granitic pegmatite; differentiation evolution; Nanping, Fujian Province

电气石是一组化学成分和结构都较复杂的矿物(王濮等,1982;Dietrich,1985;Bloodaxe *et al.*,1999),其化学结构式为: $(Na,Ca)RA_6(Si_6O_{18})(BO_3)_3(O,OH,F)_4$,式中 Na 可部分被 K 代替,R 主要为 Mg、Fe、Li、Al、Mn。根据在 R 位置上占优势的离子,电气石可分成镁铁锂电气石、钠锰电气石、钙镁电气石和布格电气石(Dietrich,1985),其中分布最广的是镁铁锂电气石。在镁铁锂电气石亚族中,又根据 Mg-Fe-Li 在 R 位置上占优势地位的离子进一步分成 3 类:以 Fe 为主时称之为铁(黑)电气石,以 Mg 为主时称镁电气石,以 Li 为主时称锂电气石。黑电气石和镁电气石通过 R 位置上 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的相互替代可构成一个较完全的类质同像系列(Bloodaxe,1999),黑电气石和锂电气石通过 R 位置上的 $2Fe^{2+}$ 和 $Li^{2+} + (Al^{3+})$ 的相互替代可构成一个不十分完全的类质同像系列,锂电气石和镁电气石则很难构成类质同像系列。

上述 3 类电气石各有其典型的产状(Henry and Guidotti,1985)。黑电气石分布最广,不仅在各类酸性岩体及岩脉中几乎都能见到(谭运金,1990),在各类热液矿床和火山块状硫化物矿床中也有广泛分布(Sheaver,1986;Taylor and Slack,1984;Slack,1996),锂电气石似乎只局限在含稀有金属的花岗岩类、特别是花岗伟晶岩中(Selway *et al.*,1999);镁电气石主要见于变质岩或交代岩中(Henry and Dutrow,1996)。世界上很难见到 3 类电气石在同一地区同一类地质体中共存,然而在我国福建南平地区具稀有金属矿化的花岗伟晶岩中 3 类电气石却共同发育,这反映了南平花岗伟晶岩形成环境的特殊性。因此,对南平伟晶岩中电气石的深入研究,不仅对探讨南平伟晶岩的形成环境有重要意义,而且对寻找伟晶岩型稀有金属矿床也能起到积极的指示作用。

1 南平花岗伟晶岩中电气石的分类及化学成分特点

福建南平是我国花岗伟晶岩集中分布区之一,目前已发现至少 500 余条伟晶岩脉。根据主要造岩矿物数量和稀有元素含量特征,可将它们分成 4 大类(杨岳清等,1987),即白云母-正长石-早期钠长石伟晶岩(I)、白云母-钠长石-正长石伟晶岩(II)、白云母-正长石-钠长石伟晶岩(III)和白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩(IV)。南平花岗伟晶岩及蚀变围岩中电气石类矿物十分发育,它们不仅是重要的副矿物,有时还构成造岩矿物,其化学成分也颇复杂(表 1),但总体属于镁铁锂电气石亚组,为此可以采用电气石结构式 R 位置上的 $Mg^{2+} + Ca^{2+} - Li^+ - Fe^{3+} + Fe^{2+} + Mn^{2+}$ 所组成的三角图解(图 1)进行分类。

不论是从野外对产电气石的地质体的广泛观察,还是从所分析的典型样品数量看,本区大量出现的是 Mg-Fe 系列的电气石(图 1),其中既有富 Fe 端员黑电气石,也有较典型的镁电气石,然而更多的是 Fe、Mg 含量均较高的过渡成员。本区虽然不存在富 Li 端员的锂电气石,但存在 Fe-Li 系列中的过渡成员——锂铁电气石。电气石在南平伟晶岩中的这种特殊组合,不仅在我国广泛分布的花岗伟晶岩中十分少见,在世界花岗伟晶岩中也未曾见有报道。

从电气石的化学成分(表 1)看,锂铁电气石的 Li_2O 含量是镁电气石和镁铁电气石的近 10 倍,但与典型的锂电气石相比, Li_2O 含量仅是它的 $1/2 \sim 2/3$, Li^+ 的位置除部分由 Na^+ 、 Ca^{2+} 取代外,可能 Fe^{2+} 也取代了 Li^+ 少部分位置,另外由于 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Li^+ 的大量存在, Mg^{2+} 也相对偏低。在挥发组分中, F 含量较高也是它的一个特点,这与产出的富 F 环境是一

表 1 电气石化学成分
Table 1 Chemical composition of tourmalines

w_B/%

产状	Ⅳ类伟晶岩			Ⅲ类伟晶岩	Ⅰ类伟晶岩	围岩					区域伟晶岩			
	B-1	DT-22	DT-26	T-5	P647-7	RZ1	RZ2	T-8	T-9	T-11	P413-7	T-12	T-14	T-16
样号	锂铁电气石			镁铁电气石										
种属	31#石英-钠长石带			31#石英-钠长石-腐锂辉石组合										
位置	31#石英-钠长石带			413 脉	647 脉	31#脉顶板	31#脉底板	31#脉夹砣	647 脉顶板	413 脉底板	413 脉夹砣	建宁Ⅱ类伟晶岩	徐墩Ⅲ类伟晶岩	房道Ⅰ类伟晶岩
SiO ₂	38.32	37.13	36.29	36.08	35.61	37.94	36.70	39.25	39.45	39.84	40.76	35.02	36.90	35.81
Al ₂ O ₃	35.27	36.68	35.96	32.48	33.24	30.10	30.36	28.92	32.90	34.00	32.50	33.94	31.64	34.16
B ₂ O ₃	10.52	10.68	10.60	10.07	8.71	10.43	10.03	11.53	9.22	11.10	9.81	11.04	11.71	9.00
Fe ₂ O ₃	1.63	1.71	0.61	4.39	2.84	1.78	2.41	1.85	1.882	3.577	0.427	4.06	5.07	2.83
FeO	5.24	4.71	1.34	5.40	10.34	6.64	7.22	7.09	3.71	2.39	6.28	8.99	6.54	10.95
K ₂ O	0.51	0.10	0.08	0.16	1.10	0.25	0.15	0.15	0.646	0.293	0.273	0.08	1.18	0.24
Na ₂ O	2.68	2.59	3.18	1.02	0.76	1.70	1.77	1.73	1.18	0.88	1.46	0.87	0.83	0.83
CaO	0.25	0.36	0.90	0.13	0.06	0.95	0.77	0.75	1.09	0.885	0.470	0.49	0.49	0.33
MgO	0.85	0.78	7.50	2.68	0.69	4.66	3.74	4.04	4.30	2.38	2.30	0.58	2.23	0.50
MnO	0.15	0.18	0.021	0.05	0.23	0.06	0.09	0.09	0.086	0.088	0.048	0.476	0.214	0.476
Li ₂ O	0.70	0.84	0.020	0.047	0.025	0.036	0.055	0.131	0.012	0.027	0.067	0.043	0.041	0.160
TiO ₂	0.032	0.096	0.024	0.59	0.21	1.54	0.92	1.06	0.02	0.04	0.04	0.48	1.22	0.14
CO ₂	0.22	0.28	0.19	0.14	0.03	0.06	0.01	0.09	0.08	0.20	0.16	0.39	0.19	0.20
H ₂ O	0.85	0.89	0.59	3.45	4.00	3.47	3.60	3.70	3.30	3.43	3.95	0.89	1.31	1.10
F	2.33	1.28	1.41	0.440	0.320	0.319	0.480	0.568	0.11	0.09	0.11	0.43	0.395	0.44
-2F=O	0.979	0.538	0.592	0.185	0.134	0.134	0.202	0.239	0.046	0.038	0.046	0.181	0.166	0.185
Total	98.57	97.77	98.12	96.84	98.03	99.80	99.10	100.71	97.94	99.18	98.61	97.60	99.79	96.98
Na ⁺	0.87	0.848	1.033	0.331	0.256	0.543	0.586	0.543	0.379	0.276	0.465	0.293	0.272	0.285
Ca ²⁺	0.045	0.065	0.161	0.023	0.011	0.168	0.140	0.13	0.194	0.153	0.083	0.091	0.088	0.063
Fe ³⁺	0.205	0.217	0.077	0.357	0.572	0.22	0.309	0.226	0.236	0.435	0.053	0.532	0.643	0.377
Fe ²⁺	0.734	0.665	0.188	1.442	0.783	0.916	1.029	0.961	0.515	0.323	0.860	1.310	0.924	1.122
Mg ²⁺	0.212	0.197	1.874	0.666	0.178	1.146	0.95	0.976	1.065	0.573	0.562	0.151	0.516	0.132
Li ⁺	0.471	0.570	0.014	0.032	0.027	0.024	0.037	0.086	0.008	0.017	0.043	0.029	0.028	0.02

注 SiO₂、Al₂O₃、B₂O₃、Fe₂O₃、FeO、K₂O、Na₂O、CaO、MnO、MgO、TiO₂ 用 CXA-733 电子探针仪测定，测定者：中国地质科学院矿产资源所王文瑛；Li₂O 用原子吸收分光光度计测定，CO₂、H₂O、F 由离子选择电极法测定，测定单位：国家地质实验测试中心。

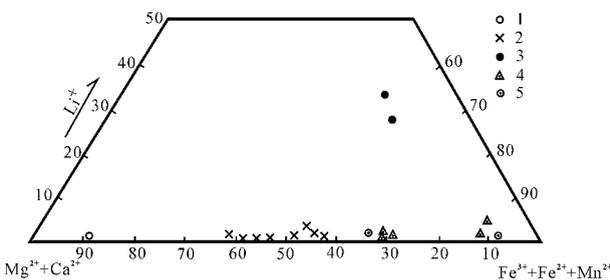


图 1 南平伟晶岩中电气石的分类

Fig. 1 Classification of tourmaline family in Nanping

pegmatites

- 1—Ⅳ类伟晶岩中的淡蓝色镁电气石；2—Ⅲ、Ⅳ类伟晶岩蚀变围岩中的镁铁电气石；3—Ⅳ类伟晶岩中的黄绿色锂铁电气石；4—区域伟晶岩中的铁电气石；5—Ⅰ、Ⅱ类伟晶岩中的铁电气石

- 1—light blue dravite in Type Ⅳ pegmatite；2—Mg-Fe tourmaline in altered adjacent rock of Type Ⅲ, Ⅳ pegmatite；3—yellowish-green Li-Fe tourmaline in Type Ⅳ Li-Fe tourmaline；4—iron-tourmaline in regional pegmatite；5—iron-tourmaline in Type Ⅰ and Ⅱ pegmatite

致的(杨岳清等,1987)。

本区镁电气石的 MgO 的含量虽然不及夕卡岩中的镁电气石(辽宁前震旦纪夕卡岩中镁电气石 MgO 的含量高达 11.56%)，但和国内外酸性岩中的镁电气石基本相当。由于 MgO 的增高，FeO、Fe₂O₃、Li₂O 含量明显偏低，但 Al₂O₃ 和 Na₂O 相对较高，填补了 Fe³⁺、Fe²⁺ 和 Li⁺ 位置上的空缺。另外，由于和锂铁电气石产于同一伟晶岩脉中，F 含量也较高。

区内的镁铁电气石特别是黑电气石(样号 P647-7、T-5 等)，化学成分突出的特点是 FeO、Fe₂O₃ 明显偏高，FeO+Fe₂O₃/MgO 最高达 19.1，FeO 含量最高达 10.34%，反映了它们是在富铁环境中形成的(Pirajino,1992)。其碱金属的含量明显低于前两类电气石，由于 Fe₂O₃(包括 SiO₂)含量增高，使 Al₂O₃ 含量降低。在挥发组分中，以 H₂O 偏高、F 偏低而和

前两类电气石明显不同。

2 电气石的 X 射线衍射分析

南平地区伟晶岩及蚀变围岩中的上述 3 类电气石均属三方晶系,相应的空间群为 C_3^2V-R3m ,其晶胞参数如表 2 所示。

总体来看,几类电气石的晶胞参数差距不大,特

别是不同产状的镁铁电气石类之间差异甚微。但上述电气石中,占据晶格位置的一些离子,由于半径及其物化性质的不同,其结构仍显示出一定的差异。锂铁电气石和镁电气石的晶胞参数小于镁铁电气石类,显然这和 Li、Mg 的离子半径小于 Fe^{2+} 有一定关系。锂铁电气石和镁电气石相比,前者的晶胞参数又小于后者。

表 2 中所列一些典型电气石样品的 X 光衍射

表 2 电气石的晶胞参数
Table 2 Unit cell parameters of tourmalines

样号	电气石类别	$V/10^{-10}m^3$	$a_0/10^{-10}m$	$c_0/10^{-10}m$	产状	c/a
T-5	黑电气石	1 576.8	15.947 44	7.159 18	产于白云母-钾长石-钠长石伟晶岩中,被石英、钠长石交代	0.449
T-12	黑电气石	1 574.23	15.940 24	7.153 97	产于区域白云母-钾长石伟晶岩中	0.449
T-8	镁铁电气石	1 574.41	15.937 69	7.148 02	产于白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩的围岩夹层中	0.448
DT-22	锂铁电气石	1 558.88	15.901 37	7.118 91	产于白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩的钠长石带	0.448
DT-26	镁电气石	1 563.02	15.878 74	7.158 14	产于白云母-钠长石-锂辉石伟晶岩的腐锂辉石中	0.451

测定者:中国地质科学院矿产资源研究所。

数据列于表 3。从表 3 不难看出,尽管几种电气石的衍射数据极其相似,但正如晶胞参数有差异,它们在最主要面网上产生的衍射谱线仍各有其特点。

镁铁电气石(样品 T-8)最主要的衍射谱线是 3.453(100)、2.946 9(84)、2.038 0(50)。铁电气石(样品 T-5)的最主要的谱线是 3.462 9(100)、2.951 7(78)、2.041 1(46)。锂铁电气石(样品 DT-22)的典型谱线是 3.443 2(100)、2.935 6(87)、2.567 3(92)、2.032 8(58)。镁电气石(样品 DT-26)的典型谱线是 3.955 4(100)、4.192 4(32)、2.566 6(79)、2.032 2(23)。它们分别与 JCPDS 中标准矿物的特征谱线十分接近。

3 红外吸收光谱特征

电气石的红外光谱分析由中国地质科学院矿产资源研究所郭立鹤进行,记录仪器为岛津 IR-450 红外分光光度计, KBr 压片,样品各重约 4 mg,结果见图 2 所示。

3 600~3 300 cm^{-1} 波段是电气石中“OH”的伸缩振动,但其曲线形态在不同电气石中还是有所不同(张志兰,1980)。镁电气石和锂电气石在 3 545 cm^{-1} 和 3 421 cm^{-1} 出现了两个明显的吸收带,而镁铁电气

石(铁电气石)仅在 3 500 cm^{-1} 出现了 1 个较强的吸收带。这是由于在镁电气石中可能存在 F^- 对 $(OH)^-$ 的较多置换,因此在 $(OH)^-$ 谱带出现两个吸收峰。在锂铁电气石中也有类似情况,另外除存在“OH”- Li^+ 和“OH”- Al^{3+} 振动外,也可能存在“OH”- Fe^{2+} 的振动。在镁铁电气石中“OH”仅分别与 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 相连, F^- 的作用甚小,因此只出现 1 个峰值。

1 350~1 230 cm^{-1} 为 $B_{III}-O$ 伸缩振动,该吸收带的共同特点是一般具有两个峰,且波数低的吸收带均表现为强吸收,其中镁电气石的吸收频率大于锂电气石,而锂电气石又大于镁电气石,即从镁电气石到镁铁电气石,红外吸收波谱从长波向短波方向移动。

$B_{III}-O$ 对称伸缩振动在 1 000 cm^{-1} 附近, $B_{III}-O$ 不对称伸缩振动在 620 cm^{-1} 附近,由于它们与 $Si_{IV}-O$ 伸缩振动和 $Al_{IV}-O$ 振动区间基本一致,且 $Si_{IV}-O$ 伸缩振动谱带较强,故 $B_{III}-O$ 振动的确切波谱较难确定。

620~570 cm^{-1} 谱带的出现和电气石中铝氧八面体中六次配位的铝引起的 $Al_{VI}-O$ 振动有关,其特点是仅在 580 cm^{-1} 和 610 cm^{-1} 附近出现两个肩,而 520~400 cm^{-1} 谱带的出现可能为 $Me-O$ 振动(Me 为 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 等离子)重叠在一起所致。

表 3 电气石的粉晶 X 射线衍射数据
Table 3 X-ray power diffraction date of tourmalines

铁电气石(T-5)				镁电气石(DT-26)				镁铁电气石(T-8)				锂铁电气石(DT-22)			
2θ	d	$I/\%$	hkl	2θ	d	$I/\%$	hkl	2θ	d	$I/\%$	hkl	2θ	d	$I/\%$	hkl
8.870	9.9615	4	101	8.960	9.8616	1		8.905	9.9224	2		8.930	9.8947	3	
13.930	6.3523	36	021	14.000	6.3207	1	100	14.005	6.3185	34		14.010	6.3162	30	110
17.855	4.9638	14	300	17.950	4.9255	1		17.900	4.9514	13	11 $\bar{1}$	17.910	4.9486	17	11 $\bar{1}$
19.290	4.5976	6	211	19.455	4.5590	17	11 $\bar{2}$	19.350	4.5835	6		19.345	4.5847	9	11 $\bar{2}$
21.055	4.2160	30	220	21.175	4.1924	32	20 $\bar{1}$	21.105	4.2362	32	20 $\bar{1}$	21.150	4.1973	38	20 $\bar{1}$
22.300	3.9834	37	012	22.460	3.9554	100	20 $\bar{2}$	22.350	3.9746	39		22.355	3.9737	51	20 $\bar{2}$
25.705	3.4629	100		25.720	3.4609	27	110	25.780	3.4530	100		25.855	3.4432	100	110
26.785	3.3257	8		26.855	3.3172	20		26.745	3.3306	11		26.725	3.3330	47	
27.935	3.1913	1	410	27.965	3.1880	9		28.140	3.1686	2	200	28.000	3.1841	5	
29.580	3.0175	6	122	29.905	2.9854	18		29.670	3.0086	5	21 $\bar{3}$	29.705	3.0051	9	21 $\bar{3}$
30.255	2.9517	78	321	29.905	2.9479	31	21 $\bar{1}$	30.305	2.9469	84	21 $\bar{1}$	30.425	2.9356	87	21 $\bar{1}$
30.850	2.8961	5	312	30.295	2.9427	31	21 $\bar{1}$	30.910	2.8906	5	30 $\bar{2}$	30.930	2.8888	6	30 $\bar{2}$
34.220	2.6182	5	051	30.350				34.290	2.6130	4	30 $\bar{1}$				
34.800	2.5759	70	042		2.5666	79	22 $\bar{3}$	34.835	2.5734	78	22 $\bar{3}$	34.920	2.5673	92	23 $\bar{3}$
36.110	2.4854	4	241	34.930	2.4921	2		36.180	2.4808	4	22 $\bar{2}$				
36.610	2.4526	3	232	36.010	2.4445	3	31 $\bar{3}$	36.635	2.4510	3	31 $\bar{3}$	36.695	2.4471	6	31 $\bar{3}$
37.900	2.3720	17	511	36.735	2.3654	9	31 $\bar{2}$	37.795	2.3784	28		37.955	2.3687	28	
38.395	2.3426	9		38.010	2.3321	15	21 $\bar{3}$	38.410	2.3417	10	21 $\bar{3}$	38.545	2.3338	15	21 $\bar{3}$
39.245	2.2938	2	502	38.575	2.2876	1		39.465	2.2815	3	210	39.610	2.2735	4	210
41.245	2.1871	11	431	39.355	2.1785	5	22 $\bar{2}$	41.300	2.1843	12	22 $\bar{2}$	41.435	2.1775	12	22 $\bar{2}$
41.700	2.1642	9	303	41.415	2.1541	9	40 $\bar{3}$	41.755	2.1615	8	40 $\bar{3}$	41.865	2.1561	12	40 $\bar{3}$
42.660	2.1177	46		41.905	2.1194	6		42.710	2.1154	23	300	42.955	2.1039	21	
44.345	2.0411	5	440	42.625	2.0322	23	32 $\bar{3}$	44.415	2.0380	50	32 $\bar{3}$	44.550	2.0322	58	32 $\bar{3}$
45.445	1.9942	24	342	44.550	1.9946	8		45.500	1.9919	3	40 $\bar{4}$	45.500	1.9919	6	
47.385	1.9170	11	413	45.435	1.9109	17	41 $\bar{3}$	47.425	1.9155	24	41 $\bar{3}$	47.57	1.9100	30	41 $\bar{3}$
48.615	1.8713	5	621	48.790	1.8650	2	40 $\bar{1}$	48.685	1.8688	11	40 $\bar{1}$	48.85	1.8629	9	40 $\bar{1}$
49.215	1.8499	8	333	49.400	1.8434	5	31 $\bar{4}$	49.245	1.8488	6	31 $\bar{4}$	49.355	1.8450	6	31 $\bar{4}$
51.425	1.7755	5		51.510	1.7727	2	211	51.505	1.7729	11	41 $\bar{2}$	51.715	1.7662	10	211
52.865	1.7305	3		52.965	1.7274	2		52.880	1.7300	7	220	53.105	1.7323	5	220
54.200	1.6909	25	603	54.495	1.6825	1	42 $\bar{4}$	54.335	1.6871	3	42 $\bar{4}$	54.425	1.6845	3	310
55.410	1.6568	11	271	55.540	1.6533	9	33 $\bar{3}$	55.460	1.6555	26	33 $\bar{3}$	55.660	1.6500	30	33 $\bar{3}$
55.940	1.6424	15	550	56.205	1.6353	13	42 $\bar{5}$	55.975	1.6415	10	42 $\bar{5}$	56.170	1.6362	14	42 $\bar{5}$
57.765	1.5948	4	722	58.100	1.5864	16	400	57.755	1.5950	11	50 $\bar{5}$	57.910	1.5911	15	50 $\bar{5}$
60.615	1.5264	22	054	60.615	1.5264	5	51 $\bar{3}$	60.660	1.5254	4	42 $\bar{4}$	60.85	1.5211	4	42 $\bar{4}$
61.675	1.5027			61.755	1.5010	9	42 $\bar{6}$	61.755	1.5010	24	33 $\bar{2}$	62.055	1.4944	25	33 $\bar{2}$

测试单位：中国地质科学院矿产资源研究所 测试仪器：Philips-Pw1700 自动粉末衍射仪 测试条件：K α Cu 45 kV, 40 mA.

4 差热分析

样品的差热分析由中国地质科学院矿产资源研究所测试 热谱仪起止温度：室温~1 200℃，灵敏度：±100 μ V，中性体： α -Al₂O₃ 结果见图 3。

从图 3 看出，几种电气石的差热曲线极其相似，它们最后失水并发生相转变的温度变化于 970~1 000℃ 范围内，但由于矿物种毕竟不同，因此它们中挥发组分的减少程度也有差别。T-12 失重高达 5%，T-26 和 T-8 次之，分别为 4.6% 和 4.0%，T-16、

T-2 最少，分别为 3.3% 和 2.6%，这些数值基本和化学分析中挥发组分含量一致。几种电气石差热曲线的差异，实际上反映了不同矿物结晶时环境温度的差异，形成温度愈高，矿物中包含的水分愈少，在差热分析中其失重也愈少。

5 物性和光性

电气石的种类不同，在物性和光性上均显示较大的差异。

铁电气石以不完整的柱状晶体为主，长轴与柱

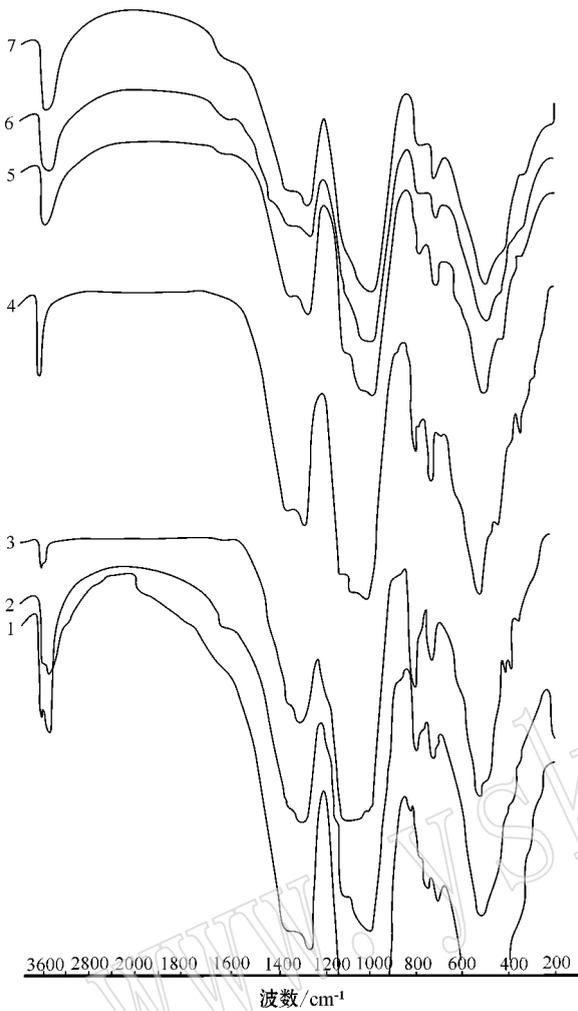


图2 南平伟晶岩中电气石的红外吸收光谱

Fig. 2 Diagram showing infrared absorption spectra of tourmalines in Nanping pegmatites

1—Ⅳ类伟晶岩腐锂辉石中的镁电气石；2、3—Ⅳ类伟晶岩中的锂铁电气石；4—Ⅳ类伟晶岩蚀变围岩中的镁铁电气石；5—Ⅲ类伟晶岩中的铁电气石；6—Ⅰ类伟晶岩中的铁电气石；7—Ⅰ类伟晶岩蚀变围岩中的铁电气石

1—dravite in altered spodumene of type IV pegmatite；2 and 3—Li-Fe tourmaline in type IV pegmatite；4—Mg-Fe tourmaline in altered adjacent rock of type IV pegmatite；5—iron-tourmaline in type III pegmatite；6—iron-tourmaline in type I pegmatite；7—iron-tourmaline in altered adjacent rock of type I pegmatite

面直径比为10:1~5:1,少数呈柱粒状,柱面直径为0.5~7 mm。宏观主要呈黑色,显微镜下基本呈墨绿色。柱面纵纹清楚,横断面呈球面三角形,断口不平整,性脆,半透明,玻璃光泽,硬度在6左右,实测密度为3.282 g/cm³。偏光镜下多色性与吸收性均很显著,一轴晶,负光性,平行 N_o 时,显深蓝或黄棕色,平行 N_e 时,显黄色-无色,而且单个颗粒在偏光镜下就显两种颜色,其变化截然,Ⅲ类型伟晶岩中的

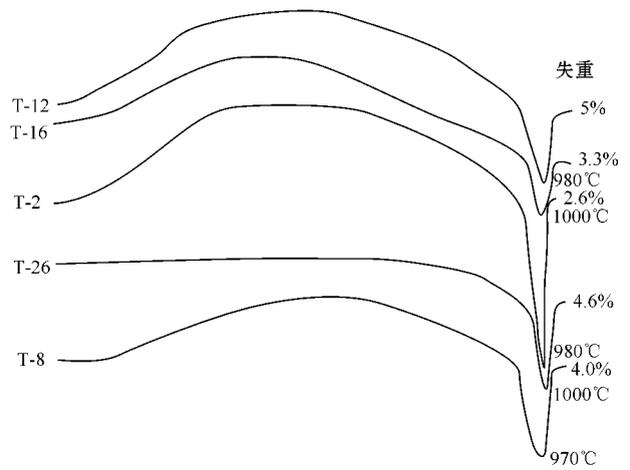


图3 南平伟晶岩中电气石的差热曲线

Fig. 3 Diagram showing differential thermal curves of tourmalines in Nanping pegmatites

部分铁电气石在横断面上还显示环带,里圈较外圈颜色深,显示了从早到晚流体成分由富铁向贫铁方向演化。糙面显著,横裂理相当发育。

锂铁电气石多呈不完整柱状,柱面直径多在0.1~1 mm,粗粒者可达1.5~2.5 mm,长宽比为2~2.5:1,极少数晶体较完好者可见(1011)(1120)(1010)等晶面,晶面平滑,少见平行 c 轴的晶面纵纹。主要呈暗黄绿色、蓝灰色,条痕淡绿白色,玻璃光泽,以半透明为主,少数透明,无解理,断口不平整-次贝壳状,性脆,硬度在6左右,实测密度为3.074 g/cm³。偏光镜下,多色性介于黑电气石和镁电气石之间,正突起中等, $n_e = 1.628$,无色, $n_o = 1.6487$,淡蓝色,吸收性公式为 $n_o > n_e$ 。横裂理较发育,正交偏光镜下干涉色可达一级顶部,平行消光,负延性,一轴晶,负光性。

镁电气石一般呈针状,细长柱状,横截面直径多为0.3~1.5 mm,个别可达5 mm,长轴与横截面直径比较大,普遍在5:1以上,呈棕色-深棕色,柱面纵纹不如黑电气石清楚。其他物理性质类似黑电气石,实测密度为3.174 g/cm³。

6 电气石的产状及共生组合

大量研究工作证实,福建南平花岗伟晶岩从Ⅰ类到Ⅳ类伟晶岩是同源花岗质熔体→溶液、演化→继承→发展的关系(杨岳清等,1987)。

在第Ⅰ类型伟晶岩中,仅发育富铁的黑电气石,主要分布在脉体与围岩的接触部位,颗粒粗大,裂纹

发育,常交代早期正长石、钠长石,与大片白云母近于同时生成,而细小鳞片状白云母、绢云母常沿黑电气石裂纹对其进行交代,交代强烈时,电气石仅保留其假像,在紧靠伟晶岩脉壁的蚀变围岩中也有较多黑电气石分布。

在第Ⅱ类型伟晶岩中,也仅发育黑电气石,其数量相对第Ⅰ类型伟晶岩有所减少,呈细小粒状分布于脉体中,与白云母、磷灰石等富挥发组分矿物伴生。

在第Ⅲ类型伟晶岩中,黑电气石颇为发育,主要见于较晚形成的石英-细鳞白云母矿物组合带或脉体边部的石英-白云母矿物组合带,电气石的长轴指向矿物组合带在伟晶岩中的延伸方向常交代熔蚀早期形成的钾长石、石英、钠长石等矿物,形成筛状包体结构,其中还常含有短柱状锆石包体,与富含挥发组分的白云母、绿柱石、磷灰石等矿物密切共生,另外在强烈蚀变的围岩——石英云母片岩中相对较富镁的黑电气石。

在第Ⅳ类型伟晶岩中,电气石种类与前3类伟晶岩明显不同,而且产状也较复杂,可以分出两类电气石:一类是Li-Fe系列的中间成员——锂铁电气石,它主要分布在靠近脉体外侧的石英-钠长石组合带与细鳞白云母相邻地段,矿物的长轴方向与这两个带的延长方向一致,常见到细晶钠长石、石英、钾长石被锂铁电气石交代熔蚀而包裹其中,使电气石具明显的筛状结构,其后又被糖晶状钠长石、绢云母、晚期石英穿入其中的裂隙中。另一类是Mg-Fe系列成员,可进一步分出两种。一种是镁电气石,它产出在由锂辉石蚀变而成的绢云母(石英)集合体中(通常称之为腐锂辉石),在热液蚀变而成的这类集合体中,镁电气石呈细针状、放射状集合体,在正交偏光镜下非常艳丽。另一种是镁铁电气石,它主要产出在该类伟晶岩的蚀变围岩中,特别在伟晶岩的围岩夹层中十分发育,含量有时可达50%,形成电气石-铝黑鳞云母-石英交代岩或电气石-白云母-石英交代岩,多被石英交代形成穿孔结构,形成时间与铝黑鳞云母基本同时或稍晚。

不同类型电气石的产状不同,表明伟晶熔体-热液的分异演化及不同类型伟晶岩的形成环境和条件对它们的产出具有重要的控制作用。

7 南平伟晶岩中电气石形成的地球化学环境及其变化规律

电气石作为花岗岩及其花岗伟晶岩中重要副矿

物,在国内外同类地质体中几乎均能见到(Roda *et al.*, 1999)。在南平伟晶岩中也是如此,它贯穿于南平伟晶岩形成的全过程,并且由于它在不同环境中具有不同的成分和结构特点,因此它也是很典型的环境指示矿物(毛景文等, 1990, 1993)。

在南平花岗伟晶岩形成早期,即第Ⅰ类伟晶岩形成阶段,就有数量较多的黑电气石生成。形成Ⅰ类花岗伟晶岩的熔体以相对偏基性为特征,主要体现在伟晶岩组成上:①在4类伟晶岩的最主要造岩矿物钠长石中,以Ⅰ类伟晶岩钠长石中Ca含量最高;②在副矿物中,磁铁矿等铁矿物也在Ⅰ类伟晶岩中相对最高;③具挥发组分的矿物,也相对在Ⅰ类伟晶岩中含量最低;④Li-Rb-Cs-Ba-Sn-Nb-Ta等稀有金属矿物含量也相对最低。从总体上看,Ⅰ类伟晶岩形成的温度、压力和成分特征类似于广泛分布的含电气石黑云母花岗岩。

在空间上,黑电气石主要分布在伟晶岩和围岩的接触部位,在此部位白云母的数量也相对较多,反映了在伟晶岩结晶过程中,挥发组分向外逃逸并在此部位形成大量富挥发组分矿物的特点。由于此阶段伟晶岩形成的环境较稳定,矿物的结晶作用也较充分,所以电气石等矿物的晶体普遍较大,而且也较完整。另外,部分富B的硅酸盐流体也迁移到邻近的下峰组变质岩系中,在交代云母、长石等过程中也形成新一代富铁的黑电气石,其 FeO/MgO 最高达19.1, $FeO/(Fe+MgO)$ 也高达0.94,是南平地区各类伟晶岩中上述两比值最高的电气石。反之,在这种黑电气石中, Li_2O 含量最低,变化于0.025%~0.074%之间,F含量也偏低,而 H_2O 含量却最高。以上特征表明,第Ⅰ类伟晶岩中的黑电气石是在一个水压较大、相对较深、稀有元素含量较低且以结晶作用占绝对优势的环境中形成的。

在Ⅱ、Ⅲ类伟晶岩中,产出的虽然也是较典型的黑电气石,但其中的 $FeO/(Fe+MgO)$ 已降低到0.64,特别是 FeO/MgO 已降低到3.63,而 Li_2O 含量从0.025%提高到0.067%,F的含量也有增加,而 H_2O 含量却较明显降低,联系到Ⅱ、Ⅲ类伟晶岩中碱金属的含量较Ⅰ类有较大幅度提高,交代作用也较明显增强,表明Ⅱ、Ⅲ类伟晶岩中的黑电气石是在一个较Ⅰ类伟晶岩形成深度浅、向开发系统开始转变、伟晶熔体-溶液中稀有元素已有较高聚集的环境中形成的。

区内的第Ⅳ类伟晶岩是具有重要经济意义的铌、钽等稀有元素矿化体,由于伟晶熔体-溶液中Li

等稀碱元素及挥发组分大量聚集,在此介质中形成的电气石成分发生了较大变化,由黄绿色的 Li-Fe 电气石取代了其他 3 类中的黑电气石,在形成时间上较明显晚于主体矿物石英、钠长石、钾长石及锂辉石-磷锂铝石等,并和较晚形成的第二世代白云母等矿物共生。这一切表明 Li-Fe 电气石是在伟晶熔体-溶液中 Li、Rb、Cs、Nb、Ta、Sn 高度富集、形成深度明显浅于 I-III 类伟晶岩、交代作用广泛发育、体系已较为开放的地质环境中形成的。由于矿物的结晶速度也相对加快,因而这类电气石的粒度明显较其他 3 类伟晶岩中的黑电气石小,并且在伟晶岩中常沿着原始伟晶熔体-溶液流动的方向排列。

在 IV 类伟晶岩的围岩中,由于交代蚀变作用的强度和广度远大于前 3 类伟晶岩,所以在蚀变类型、蚀变矿物及其化学成分上出现了较显著的变化,围岩蚀变过程中形成的电气石也与前 3 类伟晶岩蚀变围岩中生成的电气石有较大差异,突出显示在铁的含量上有明显降低,而镁的含量有大幅度提高,另外 Li 和 F 含量也甚高,产生一种黄褐色的镁铁电气石。

IV 类伟晶岩形成后,经地壳抬升、剥蚀,其中的锂辉石在离地表很近的环境中,在中低温热液蚀变转变成以绢云母为主体的“腐锂辉石”过程中,Fe、Ti 等基性组分较多流失,而 Mg 相对得到了集中,从而借助流体中残余的 B、Si、Al 和 F 等成分形成了十分特征的针状及放射状镁电气石,显然,镁电气石形成的地质环境已不属于内生伟晶作用范畴,但其在 Li、F 和 H₂O 的含量上又继承了 IV 类伟晶岩中 Li-Fe 电气石的一些特征,其产状在国内外伟晶岩区十分少见。

总体看,南平伟晶岩及蚀变围岩中的电气石形成顺序是:黑色铁电气石→黄绿色锂电气石→黄褐色镁铁电气石→浅灰蓝色镁电气石。

References

Bloodaxe E S, Hughes J M, Dyar M D, *et al.* 1999. Linking structure and chemistry in the schorl-dravite series [J]. *Am. Mineral.*, 84: 922~928.

Dietrich R V. 1985. *The Tourmaline Group* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 300.

Henry D J and Guidotti C V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: An example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine [J]. *American Mineralogist*, 70: 1~15.

Henry D J and Dutrow B L. 1996. Metamorphic tourmaline and its petrologic applications [J]. *Review in Mineralogy*, 33: 503~557.

Mao Jingwen, Chen Yuchuan, Chen Qingxun, *et al.* 1990. Two types of tourmaline from northern Guangxi, China and as an indication for metallogenic environment [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9(4): 289~299 (in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Wang Pingan, Wang Denghong, *et al.* 1993. The tracer of tourmaline for rock-forming and metallogenic environments and its applied conditions [J]. *Geological Review*, 36(6): 497~507 (in Chinese with English abstract).

Pirajino F and Smithies R H. 1992. The FeO/FeO+MgO ratio of tourmaline: a useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal deposits [J]. *J. of Geochemical Exploration*, 42: 371~381.

Roda E, Pesquera A and Velasco F. 1999. Tourmaline in granitic pegmatites and their country rocks, Fregeneda area, Salamanca, Spain [J]. *Can. Mineral.*, 33: 835~848.

Sheaver C K, Papike J J and Simon S B. 1986. Pegmatite-wallrock interactions, Black Hills, South Dakota: Interaction between pegmatite-derived fluids and quartz-mica schist wallrock [J]. *American Mineralogist*, 71(3/4): 518~539.

Slack J F. 1996. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits [J]. *Review in Mineralogy*, 33: 559~643.

Selway J B, Novak M, Hawthorne F C, *et al.* 1999. Compositional evolution of tourmaline in lepidolite-subtype pegmatites [J]. *Eur. J. Mineral.*, 11: 569~584.

Taylor B E and Slack J S. 1984. Tourmalines from Appalachian-Caledonian massive sulfide deposits: textural, chemical and isotopic relationship [J]. *Econ. Geol.*, 79: 1703~1726.

Tan Yunjin. 1990. Main feature of tourmaline granite, Southern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (4): 46~53 (in Chinese with English abstract).

Wang Pu, Pan Zhaolu, Weng Lingbao, *et al.* 1982. *Systematic Mineralogy (series 2)* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Yang Yueqing, Ni Yunxiang, Guo Yongquan, *et al.* 1987. Rock-forming and ore-forming characteristics of the Xikeng granitic pegmatites in Fujian Province [J]. *Mineral Deposits*, 6(3): 12~21 (in Chinese).

Zhang Zhilan. 1980. Tourmaline and its infrared spectrum in rare element granitic pegmatites, Eastern Qinling [J]. *Bulletin of Chengdu Geological College*, (2): 55~61 (in Chinese).

附中文参考文献

毛景文, 陈毓川, 陈晴勋, 等. 1990. 中国桂北地区两类电英岩及其对成矿环境的指示 [J]. *岩石矿物学杂志*, 9(4): 289~299.

毛景文, 王平安, 王登红, 等. 1993. 电气石对成岩成矿环境的示踪性及应用条件 [J]. *地质论评*, 36(6): 497~507.

谭运金. 1990. 华南地区电气石花岗岩的主要特征 [J]. *岩石学报*, (4): 46~53.

王 濮, 潘兆楷, 翁玲宝, 等. 1982. *系统矿物学(中)* [M]. 北京: 地质出版社.

杨岳清, 倪云祥, 郭永泉, 等. 1987. 福建西坑花岗伟晶岩成岩成矿特征 [J]. *矿床地质*, 6(3): 12~21.

张志兰. 1980. 秦东稀有元素花岗伟晶岩中电气石及其红外光谱 [J]. *成都地质学院学报*, 2: 55~61.