

贵州大坪电气石岩的发现及其找矿意义

王劲松¹, 周家喜², 杨德智^{1,3}, 陈昌平¹, 包广萍², 刘永坤¹

(1. 贵州地矿局 102 地质大队, 贵州 遵义 563003; 2. 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, 贵州 贵阳 550002; 3. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在贵州从江大坪多金属矿区东部地质填图过程中发现电气石岩层, 对其进行了岩矿鉴定和粉晶衍射(XRD)、电子探针(EPMA)、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等分析, 结果表明电气石岩的矿物组成为电气石 40%~60%、石英约 35%~55%, 其他约 5% 为各低含量组分(绿泥石、稀土矿物、锆石等)之和; 电气石化学组成中 $FeO/(FeO+MgO)(Fe^{\#})$ 和 $MgO/(FeO+MgO)(Mg^{\#})$ 分别为 0.64~0.67 和 0.33~0.36, 表明该电气石属于黑电气石—镁电气石固溶体系列; 电气石岩的稀土元素特征为稀土元素总量低($\Sigma REE=21.43\times 10^{-6}\sim 26.82\times 10^{-6}$), 轻稀土元素(LREE)富集, 中稀土元素(MREE)亏损, 并具有弱的 Eu、Ce 异常; 成矿元素 W、Sn、Zn、As、Bi 等较高程度富集, 指示 W、Sn、Zn 等具有很大的成矿潜力。电气石岩的发现对该区寻找 W、Sn 多金属矿床具有重要的指示意义。

关键词: 电气石岩; 电气石; 稀土元素; 从江大坪; 贵州

中图分类号: P618; P578.953

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)01-0032-09

The discovery of hyalotourmalite in Daping, Guizhou Province, and its ore-prospecting significance

WANG Jin-song¹, ZHOU Jia-xi², YANG De-zhi^{1,3}, CHEN Chang-ping¹,
BAO Guang-ping² and LIU Yong-kun¹

(1. No. 102 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration, Zunyi 563003, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposits Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Located in the transitional zone between the Yangtze craton and the South China fold system, Congjiang area lies in southwest Jiangnan orogenic belt. The main strata are Wentong Formation of Mesoproterozoic Sibogroup and Jialu Formation (Qbj), Wuyue Formation (Qbw), Fanzhao Formation (Qbf) and Gongdong Formation (Qbg) of Qingbaikou System in Neoproterozoic Xiajiang Group. These strata are composed of metamorphosed sedimentary rocks, mainly sericite slate and sandy slate. Magmatic rocks and tectonics are well developed in this area. There are ultrabasic rocks, basic rocks and acid intrusive rocks, with the Motianling granite being the largest intrusive body. There exist three groups of faults trending respectively NS, NWW and NNE, with the Zaibian fault being a discordogenic fault. Haylotourmalite was found by geological mapping in the east of the Daping polymetallic ore district in southeast Guizhou Province. Analyses by means of determinative mineralogy, X-Ray Diffraction (XRD), Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) show that haylotourmalite is black to dark gray in color and has ribbon structure, with an alternate arrangement of dark and light colored stripes that shows a rhythmic varia-

收稿日期: 2009-06-10; 修订日期: 2009-11-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题资助项目(2007CB411402); 中科院地化所与贵州地矿局 102 地质合作资助项目

作者简介: 王劲松(1967—), 男, 高级工程师, 长期从事矿产勘查研究工作; 通讯作者: 周家喜, E-mail: jarcyz@163.com.

tion. The haylotourmalite is composed of tourmaline (40%~60%), quartz (35%~55%), and minor amounts of chlorite, rare earth minerals and zircon. $FeO/(FeO+MgO)$ ($Fe^{\#}$) and $MgO/(FeO+MgO)$ ($Mg^{\#}$) ratios of the tourmaline are from 0.64 to 0.67 and from 0.33 to 0.36, respectively, implying that the tourmaline belongs to the aphrizite-dravite solid-solution series. The hyalotourmalite has low ΣREE values ($21.43 \mu g/g \sim 26.82 \mu g/g$) and is enriched with LREE and depleted in MREE, with $(La/Yb)_N$ ratios from 2.55 to 4.76 and $(La/Sm)_N$ and $(Gd/Yb)_N$ ratios from 5.84 to 6.17 and from 0.69 to 0.98 respectively, implying that the differentiation of the light rare earth elements and heavy rare earth elements is not very obvious; however, the differentiation of the light rare earth elements is stronger than that of the heavy rare earth elements. The haylotourmalite samples show indistinct Eu and Ce anomalies. The hyalotourmalite is also enriched with metallogenic elements such as W, Sn, Zn, As, Bi and B, which indicates a great potential in search for ore deposits of these elements. The discovery of hyalotourmalite has a great significance for the exploration of massive sulfide deposits.

Key words: hyalotourmalite; tourmaline; REE; Daping-Congjiang; Guizhou Province

电气石岩 (hyalotourmalite) 是指一种与围岩大致整合的层控岩石单元, 其中电气石所占全岩体积大于 20% (沈建忠等, 1992)。Slack 等 (1984) 强调该术语仅适用于与围岩整合产出的富电气石岩层, 没有成因含义, 故不能与其他由特定地质作用形成的富电气石岩石如电英岩 (tourmalite) 或电气石花岗岩 (luxullianite) 混为一谈。王登红等 (2000) 认为电气石产出环境不唯一, 要针对不同特定的地质环境研究其成因。

上世纪 80 年代以前有关电气石岩的研究主要与伟晶岩脉、交代岩、花岗岩体、矿化角砾岩筒及蒸发岩有关 (聂凤军等, 1993), 最近 20 年随着电气石岩在层状金、钨、锡和贱金属块状硫化物矿床及周边不断被发现, 研究广泛认为其与喷流沉积型块状硫化物矿床有着密切的关系, 并被视为层状金、钨、锡和贱金属块状硫化物矿床找矿勘探的标志岩性单元 (Bone, 1988; Plimer, 1988; Palmer and Slack, 1989; 沈建忠等, 1992; 聂凤军等, 1993; 夏学惠, 1995a, 1995b, 1997; Griffin *et al.*, 1996; 叶松等, 1997)。某些特殊环境产出的电气石岩具有重要的成因意义 (夏学惠, 1995a, 1997; 叶松等, 1997) 和找矿意义, 其常与喷气、喷流、热水沉积型块状硫化物矿床密切相关 (聂凤军等, 1993; 沈建忠等, 1993; 夏学惠, 1995a; Griffin *et al.*, 1996)。

笔者在贵州大坪多金属成矿区内地质测量过程中, 发现一处电气石岩岩层, 风化蚀变强烈, 产出部位位于黔桂边界摩天岭花岗岩体外围, 与周围发现的金、钨矿化点相近 (3 km 左右), 与多金属矿床相距也不超过 5 km。经野外观察、系统岩矿鉴定和地

球化学研究, 认为该电气石岩层具有成因和找矿意义。本文报道了该电气石岩的岩石特征及稀土元素组成, 并探讨了电气石岩的成因及找矿指示意义。

1 地质背景

贵州大坪多金属成矿区位于贵州省从江县, 距从江县城约 80 km。本区位于扬子陆块与华南褶皱系的过渡带, 即江南造山带西南段 (曾昭光等, 2003)。区内出露地层主要为中元古界四堡群和上元古界青白口系乌叶组 (Qbw)、甲路组 (Qbj)、河村组 (Qbh) 及尧等组 (Qby) (图 1), 以青白口系地层最为发育。该套地层为浅变质沉积岩, 主要为绢云母板岩及砂质板岩。区域内岩浆岩发育, 岩类复杂, 有超基性岩、基性岩、酸性侵入岩, 以黔桂边界的摩天岭花岗岩体 (桂北称三防岩体) 规模最大。构造复杂, 主要发育有南北向、北西西向和北北东向 3 组断层 (杨德智等, 2009), 以宰便断层为深大断裂。

电气石岩位于甲路组地层中, 与围岩接触界线较明显, 野外呈灰色、灰黑色, 具有明显的纹层构造。由于植被覆盖较厚, 走向延伸不详, 出露厚度大于 1 m (图 2e)。

2 样品及实验方法

对野外发现的岩石进行切片鉴定, 并进行 XRD、EPMA 及 ICP-MS 分析。电子探针分析方法为将切好的光薄片喷碳后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电子探针实验室日本岛

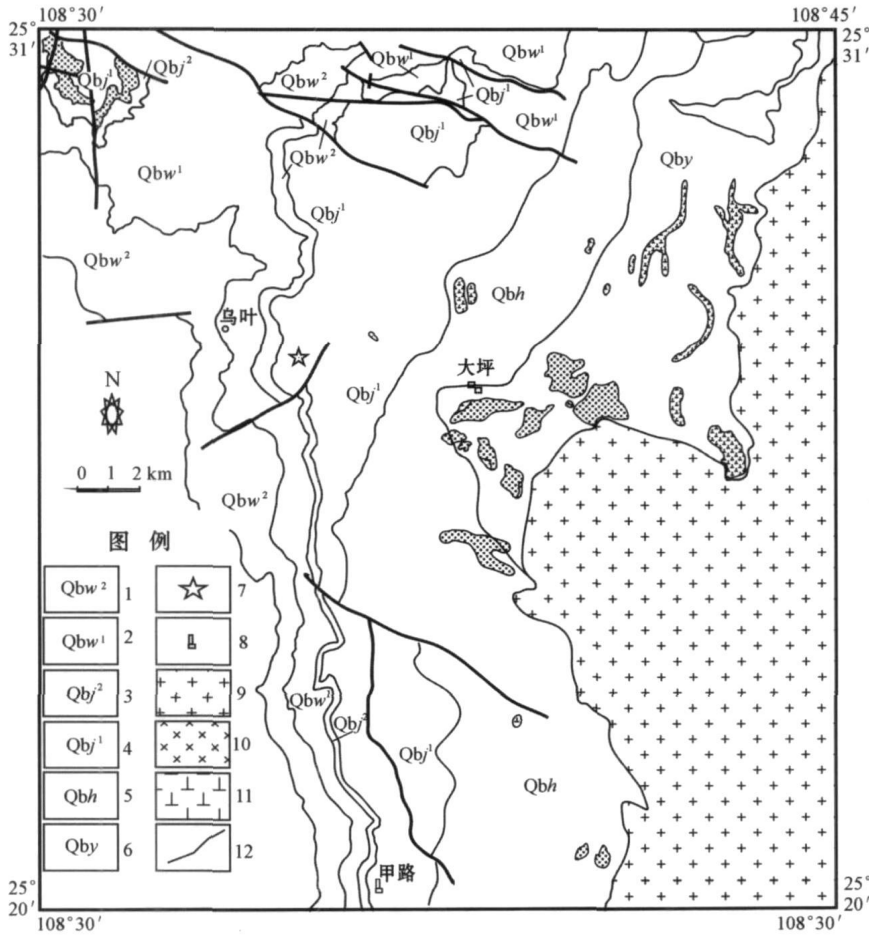


图1 贵州大坪矿区区域地质简图(据1:200 000区调资料修改)^①

Fig. 1 Simplified regional geological map (modified after 1:200 000 regional geological survey data)^①

1—乌叶组二段; 2—乌叶组一段; 3—甲路组二段; 4—甲路组一段; 5—河村组; 6—尧瓮组; 7—电气石岩发现位置; 8—村庄;
9—基性—超基性岩; 10—花岗岩; 11—闪长岩; 12—断层

1—2nd Member of Wuye Formation; 2—1st Member of Wuye Formation; 3—2nd Member of Jialu Formation; 4—1st Member of Jialu Formation;
5—Hecun Formation; 6—Yaodeng Formation; 7—discovery site of hyalotourmalite; 8—village; 9—mafic—ultramafic rocks;
10—granite; 11—diorite; 12—fault

津公司生产的 EMPA—1600 型电子探针仪上进行观察分析, 仪器工作的加速电压为 25 kV, 电流为 20 nA, 电子束束斑直径小于 1 μm。粉晶衍射分析方法为使用玛瑙研钵将样品粉碎至 200 目以下, 进行 XRD 分析; 电感耦合等离子体质谱分析方法为对粉碎好的样品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采用 ICP—MS 方法, 测试在 Finnigan MAT 公司 Element 型高分辨等离子质谱仪上进行, 该仪器对 REE 检测下限为 $(0. n \sim n) \times 10^{-12}$, 分析数据的相对误差小于 10%, 绝大多数小

于 5%, 具体分析方法见 Qi 等(2000)。

3 电气石岩岩石学及地球化学

3.1 电气石的一般特征

电气石族矿物是结构和化学成分十分复杂的环状硅酸盐矿物, 直到上世纪 50 年代对电气石晶体结构测定以后, 才提出比较合理的化学成分组成: $(Na, Ca) RA_k [Si_6O_{18}] [BO_3]_3 (O, OH, F)_4$ (王濮等, 1984), 通式可表示为: $XY_3Z_6B_3Si_6O_{27}W_4$ (杨如增等,

① 贵州地矿局. 1964. 1:20 万区域地质调查报告(榕江幅).

2007), 其结构中存在着两类八面体位置, 分别为 Z 和稍大一点但有些扭曲的 Y 八面体位置; X 位可由 Ca 或 Na 占据; Y 位由 Mg 和 Fe^{2+} 、(Al + Li) 或 Fe^{2+} (还包括 Mn, Cr, V 和 Ti) 占据; Al^{3+} 、 Fe^{3+} 或 Cr^{3+} 则可占据 Z 位, B 为三次配位, 没有明显替代; Si 位于四面体位置, 可有部分 Al^{3+} 替代 Si; W 位上亦存在 O、OH、F 的类质同像替代。根据主化学元素占位情况不同, 电气石可分为许多不同的种类, 目前国际矿物协会确认的电气石有 11 个种类(潘兆橦等, 1994), 如表 1 所示。

3.2 电气石岩岩石特征

3.2.1 矿物成分

条纹状电气石岩在外貌上与磁铁石英岩类似, 为黑—黑灰色, 层纹或条纹构造明显, 深、浅色条纹(1~3 mm)相间排列, 交替出现, 呈现出韵律性变化(图 2A)。深色条纹(或条带)由电气石 40%~60% (体积分数, 下同)和石英 15%~36% 以及少量绿泥石、云母等组成。浅色条纹(或条带)主要含石英 60%~85% 和少许绢云母、斜长石、电气石等矿物,

深、浅条纹(或条带)之间并无截然不同的界线, 只是电气石含量不同。镜下观察、XRD 及电子探针分析结果表明, 电气石岩主要由电气石、石英、绿泥石组成(图 2b、图 3d), 还含有少量云母、稀土矿物、锆石等(图 3a、3b、3c), 其中电气石多呈半自形柱状或粒状、多色性与吸收性明显, N_o 为棕黄色—中等程度蓝

表 1 不同电气石矿物主化学元素占位情况

Table 1 Some tourmaline minerals and main elements occupation in their structures

电气石种类	X 位	Y ₃ 位	Z ₆ 位	其余部分化学式
黑电气石	Na	Fe_3^{2+}	Al ₆	$B_3Si_6O_{27}X$
镁电气石	Na	Mg ₃	Al ₆	$B_3Si_6O_{27}X$
锂电气石	Na	[Li _{1.5} Al _{1.5}]	Al ₆	$B_3Si_6O_{27}X$
钠锰电气石	Na	Mn_3^{2+}	Al ₆	$B_3Si_6O_{27}X$
钙镁电气石	Ca	Mg ₃	[Mg Al ₅]	$B_3Si_6O_{27}X$
钙锂电气石	Ca	[Li ₂ Al]	Al ₆	$B_3Si_6O_{27}X$
钙铁电气石	Ca	Fe_3^{2+}	[Mg Al ₅]	B ₃ Y
铝电气石	Na	Al ₃	Al ₆	[BO ₃] ₃ Y
布格电气石	Na	Fe_3^{3+}	Al ₆	[BO ₃] ₃ [Si ₆ O ₁₈]F
铬镁电气石	Na	Mg ₃	Cr ₆	$B_3Si_6O_{27}X$
无碱电气石	空穴	$Fe_3^{2+}(Al, Fe^{3+})$	Al ₆	[BO ₃] ₃ Y

备注: X = (O, OH)₃(OH, F), Y = [Si₆O₁₈](OH)₄

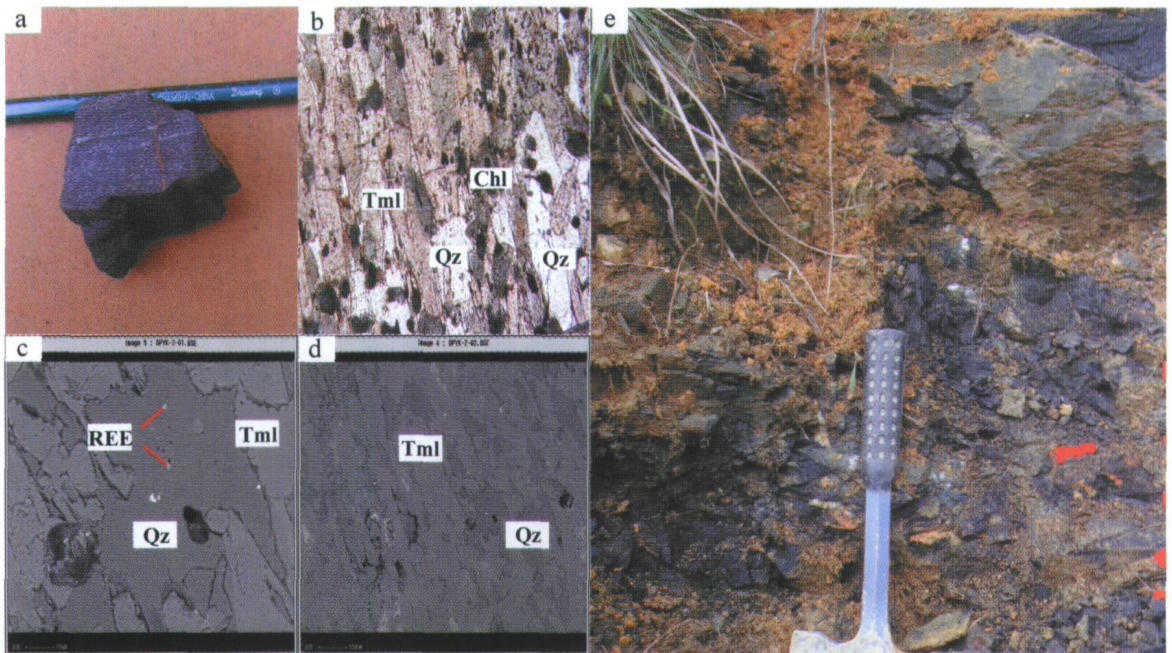


图 2 电气石岩的照片

Fig. 2 Photographs of hyalotourmalite

a—蚀变电气石岩纹层状构造, 手标本照片; b—电气石呈柱状定向排列, 不规则状石英及绿泥石等充填其间, 40×, 单偏光; c—不规则粒状石英中含有富轻、重稀土矿物, 边部亮点为锆石(分别对应图 3a、b、d); d—BSE 图; e—野外照片; Tml—电气石; Qz—石英; Chl—绿泥石
 a—laminated structure of hyalotourmalite photograph of hand specimen; b—prismatic hyalotourmalite and irregular crystal of quartz and chlorite 40×, plainlight; c—zircon and minerals enriched with LREE and HREE in the irregular crystal of quartz; d—BSE photograph; e—field photograph of hyalotourmalite; Tml—tourmaline; Qz—quartz; Chl—chlorite

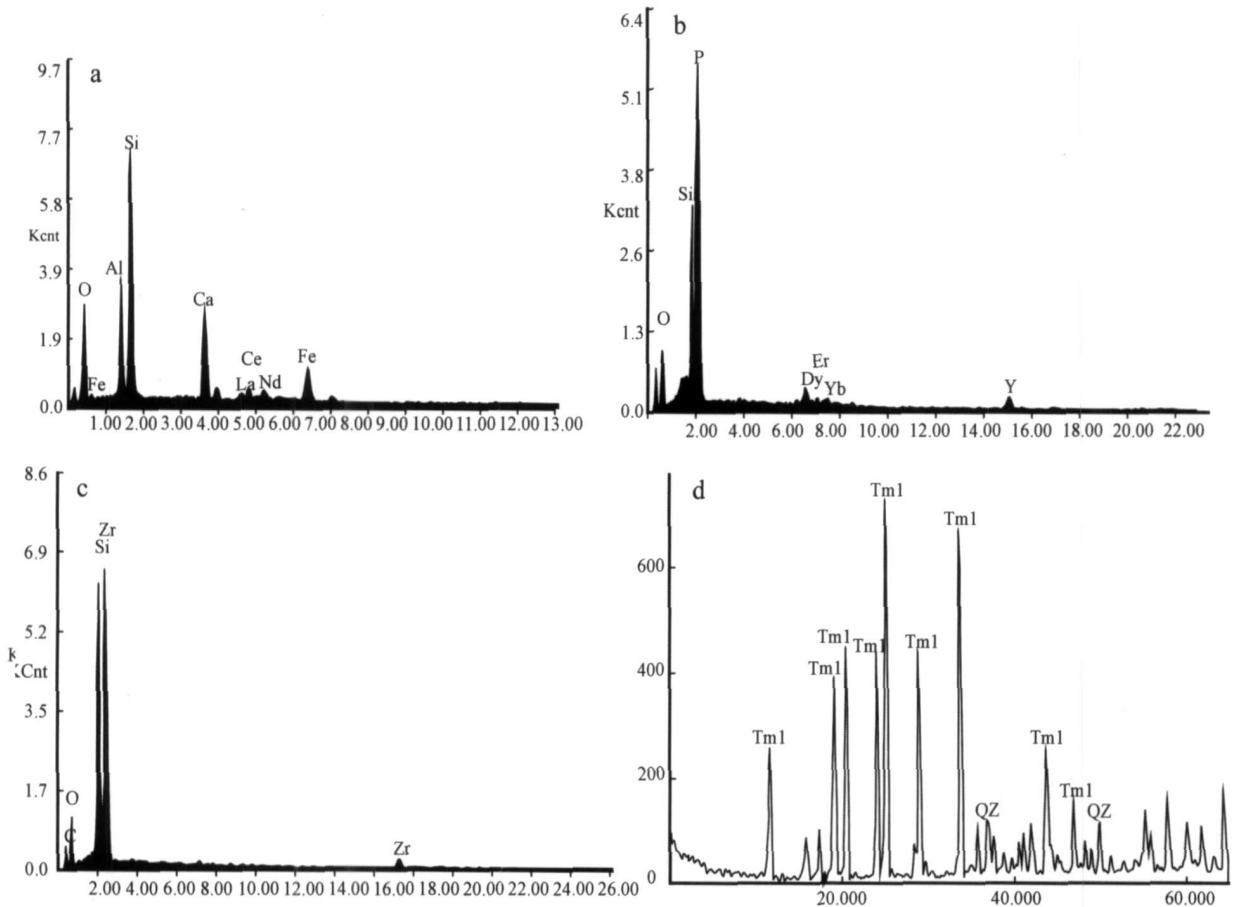


图3 电子探针能谱图及XRD衍射谱图

Fig. 3 Spectral patterns of EPMA and XRD

a—富轻稀土矿物; b—富重稀土矿物(磷钇矿); c—锆石; d—XRD谱图; Tm1—电气石; Qz—石英

a—mineral enriched with LREE; b—mineral enriched with HREE; c—zircon; d—XRD pattern; Tm1—tourmaline; Qz—quartz

棕黄色, N_e 为淡黄色—无色, $N_o = 1.661 \sim 1.673$, $N_e = 1.625 \sim 1.642$, $N_o - N_e = 0.031 \sim 0.036$ 。弧线三角形或等轴形切面常可见及, 粒径变化 $0.4 \sim 6.8$ mm, 局限可达 3 mm, 电气石的筛状和穿孔结构亦较发育; 石英一般呈他形粒状结构, 粒径小于与其共生的电气石并且常与电气石构成柱粒状变晶结构(图 2b、2c、2d)。

3.2.2 化学成分

根据电子探针数据(表 2), 该电气石岩 $Fe^{\#}$ [$FeO/(FeO + MgO)$] 为 $0.64 \sim 0.67$, 平均 0.65 , $Mg^{\#}$ [$MgO/(FeO + MgO)$] 为 $0.33 \sim 0.36$, 平均 0.34 , 该特征表明电气石岩属于黑电气石—镁电气石固溶体系列(Hery and Guidotti, 1985; 廖忠礼等, 2007), 与藏南过铝花岗岩中电气石特征相似(廖忠礼等, 2007)。

表2 电气石单矿物电子探针成分

w_B/%

Table 2 Electron microprobe analyses of tourmaline

	DPYK-1-1	DPYK-1-2
SiO ₂	33.145	35.371
TiO ₂	0.161	0.645
Al ₂ O ₃	30.915	31.93
TFeO	9.15	9.528
MnO	0.021	0.07
MgO	4.56	5.395
CaO	0.442	1.04
Na ₂ O	1.513	1.901
Cr ₂ O ₃	0.04	0.023
B ₂ O ₃	12.259	8.912
F	1.645	nd
Total	93.851	94.815

备注: 测试由中科院地化所矿床国家重点实验室电子探针分析, nd表示未测出。

3.3 成矿元素组成

对电气石岩的成矿元素分析结果(表 3)表明, 该区多金属 Co、Zn、As、Sn、W、Pb、Bi、Ag 等在电气石岩中均呈现不同程度的富集, 富集系数在 1 个数量级至 3 个数量级不等, W、Sn、Bi 的富集程度最高, 该区是 W、Sn 矿的远景成矿区, 在摩天岭花岗岩体周围相邻的广西境内产出多个大中型 W、Sn 矿, 在贵州境内尚未发现成规模的矿体, 电气石岩的发现对下一步找矿具有重要的指示意义。

表 3 电气石岩成矿元素特征 $w_B/10^{-6}$

元素	DPYK-1-1	DPYK-1-2	地壳丰度	富集系数	
				DPYK-1	DPYK-1-2
Li	8.81	0.451	21	0.42	0.021
Be	4.687	3.36	1.3	3.606	2.585
Co	91.3	94.1	25	3.652	3.764
Ni	37	31	89	0.416	0.348
Cu	23.1	22.6	63	0.367	0.359
Zn	304	297	94	3.234	3.16
As	32.19	28.105	2.2	14.632	12.775
Ag	0.206	0.184	0.08	2.575	2.3
Cd	0.677	0.33	0.2	3.385	1.65
Sn	19.4	9.17	1.7	11.412	5.394
W	1340	906	1.1	1218.182	823.636
Pb	29.708	29.147	12	2.476	2.429
Bi	0.218	0.191	0.004	54.5	47.75

分析由中科院地化所矿床地球化学国家重点实验室胡静完成, 地壳丰度采用黎彤(1976)。

3.4 稀土元素及微量元素特征

电气石岩的球粒陨石标准化配分型式为轻稀土元素富集、中稀土元素亏损、重稀土元素平坦型, 稀

土元素总量低与北美页岩球粒陨石相似(图 4a), 轻重稀土元素分异较小, Eu、Ce 异常不明显(表 4); 北美页岩标准化稀土元素配分模式显示出重稀土元素富集及明显 Eu 正异常、弱的 Ce 负异常, 与辽西凤城地区热水沉积型电气石岩(夏学惠, 1995a)具相似特征, 不同的是本区电气石岩明显亏损 Nd 元素(图 4b、表 4)。

MORB 及 NASC 标准化微量元素蛛网图均显示出亏损 Ba、Sm、Nd, 富集 Th、Sr、Hf、Zr 特征, 该特征与世界其他地区典型电气石岩基本一致(Griffin *et al.*, 1996)(表 4、图 5)。

3.5 电气石岩的成因

从前述地质特征、矿物学及岩石地球化学揭示的成因信息, 可总结出黔东南大坪电气石岩有如下特征:

(1)电气石岩在地质产状上呈岩层状产出, 具纹层状构造; 在空间上, 位于岩浆岩十分复杂的地区, 分布在摩天岭花岗岩体外围, 在构造上处于江南造山带西南段(曾昭光等, 2003); 时间上, 地幔柱活动导致 Rodinia 超大陆裂解(825 ± Ma 黄隆辉等, 2007), 摩天岭花岗岩为地幔柱活动的产物(825 ± Ma, 曾雯等, 2005), 电气石岩的形成可能与此事件相关。

(2)在岩石及岩相学特征表明, 电气石岩蚀变较强, 矿物组合简单, XRD 显示低含量组分多(图 3d), 目前缺乏变质前矿物组合特征资料。

(3)电气石的主量元素中的 Fe[#]、Mg[#] 暗示该电气石岩与岩浆岩可能存在成因上的联系, 统计资料也显示出该可能性(谭运金, 1987)。

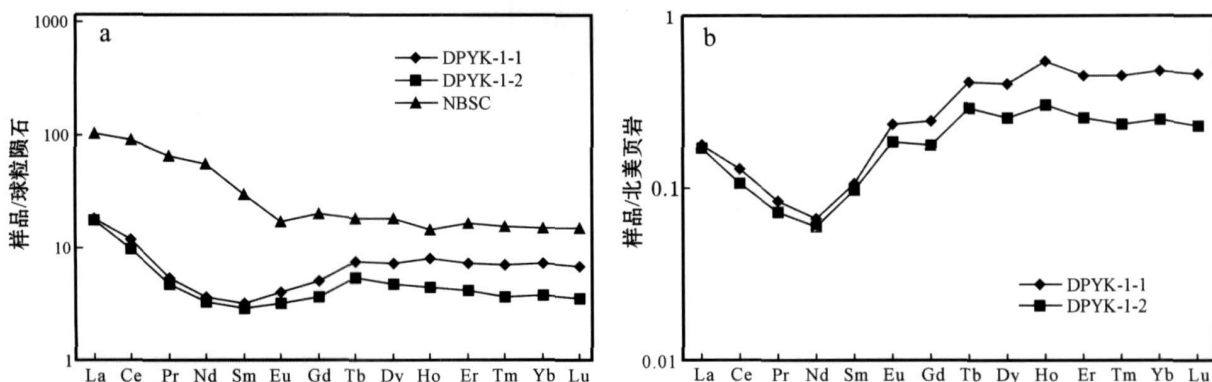


图 4 电气石岩标准化稀土元素配分模式图

Fig. 4 Chondrite and NASC normalized REE patterns of hyalotourmalite(after Boynton, 1984 and Haskin *et al.*, 1966)

表4 微量、稀土元素含量及参数特征 $w_B/10^{-6}$

Table 4 Content of trace element and REE and parameters of hyalotourmalite

元素	DPYK-1-1	DPYK-1-2
Rb	1.14	1.05
Ba	1.79	2.08
Th	11.9	10.3
U	1.41	1.44
Ta	0.87	0.26
Nb	7.88	5.67
Sr	159	145
Hf	5.39	4.29
Zr	176	134
Y	12.8	6.58
La	5.68	5.46
Ce	9.37	7.74
Pr	0.66	0.58
Nd	2.20	1.97
Sm	0.61	0.56
Eu	0.29	0.23
Gd	1.28	0.94
Tb	0.35	0.25
Dy	2.35	1.51
Ho	0.56	0.32
Er	1.52	0.87
Tm	0.22	0.12
Yb	1.50	0.77
Lu	0.22	0.11
Σ REE	26.82	21.43
$(La/Sm)_N$	5.84	6.17
$(Gd/Yb)_N$	0.69	0.98
$(La/Yb)_N$	2.55	4.76
$(La/Pr)_N$	3.38	3.74
δEu_N	1.00	0.99
δCe_N	0.98	0.86
LREE/HREE	2.35	3.38
δEu_S	1.44	1.42
δCe_S	0.98	0.87

备注: 球粒陨石采用 Boynton(1984), 北美页岩采用 Gromet 等(1984)。

(4)全岩稀土及微量元素特征表明, 其与北美页岩具相似特征, 稀土元素总量低, 轻稀土元素富集。

综上所述, 该电气石岩可能为岩浆侵入体的岩浆期后热液产物, 为热水沉积—变质改造型。

4 电气石岩的找矿意义

近年来, 在层控矿床(如贱金属、钨、锡、钴、镍和金等)中及其附近发现许多层状电气石岩(沈建忠等, 1992), 目前已积累了不少有关电气石岩地质地球化学的资料, 这些研究表明电气石岩已成为海底喷气矿床找矿勘探的重要标志之一(沈建忠等, 1992; 聂凤军等, 1993; 夏学惠, 1995a, 1995b, 1997; Griffin *et al.*, 1996; 叶松等, 1997; 王进军等, 2002)。黔东南大坪电气石岩的岩石学和岩石地球化学研究表明, 该电气石岩可能与岩浆岩存在成因上的联系, $Fe^\#$ 、 $Mg^\#$ 暗示与过铝质花岗岩有一定关系。Pirajno 和 Smithies (1992)研究认为 $Fe^\#$ 值可以指示与花岗岩有关的电气石及钨锡矿距花岗岩的远近, 大坪电气石岩的 $Fe^\#$ 、 $Fe^\#/MgO$ 暗示该电气石岩属于中源。成矿元素显示出多种金属富集, 特别是 W、Sn、Bi 的富集均对进一步找矿勘查具有重要的指示意义。

某些电气石岩本身就含有可观的 Au(如 Golden Dyke Domo)、W(如格陵兰 Molane 钨矿区)和 Sn(如宝坛矿区)。电气石岩在长期的变形和变质作用期间相对稳定, 故在变质火山—沉积地区, 尤其是变质沉积地区, 电气石岩可作为局部地区的找矿勘探依据, 沿电气石岩追索就有可能找到古喷气口, 进而有望找到喷气矿床(Bone, 1988)。在黔东南大坪电气石岩发现地不到5km的范围内, 发现多处Cu、Pb、

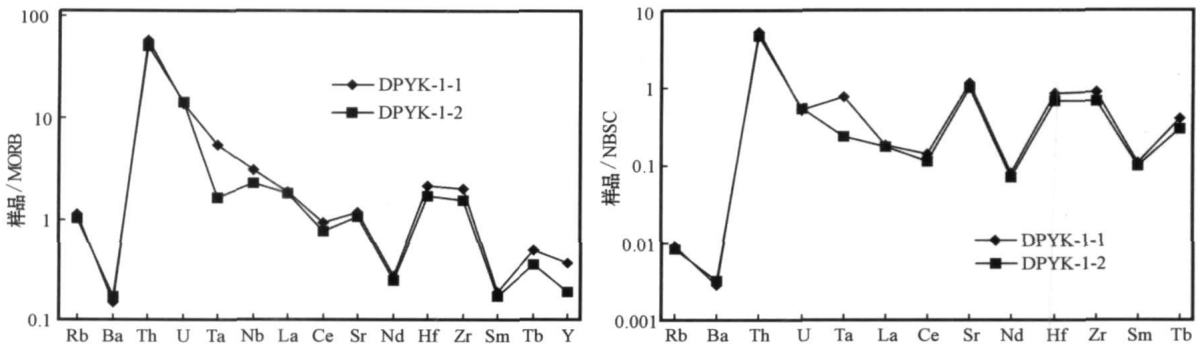


图5 电气石岩微量元素蛛网图

Fig. 5 MORB and NASC normalized trace elements patterns of hyalotourmalite(after Sun and McDonough, 1989 and

Gromet *et al.*, 1984)

Zn 多金属和 Au 等矿化点, 但规模较小, 电气石岩的发现有望实现找矿勘查的突破。

致谢 感谢科技部、国家自然科学基金委员会及 102 地质队在经费上的支持; 岩矿鉴定、电子探针分析分别得到中科院地球化学研究所刘铁庚研究员、周国富研究员和刘世荣副研究员的指导和帮助, 野外工作得到贵州地矿局 102 地质大队杜国华队长的大力支持, 在此对他们及匿名评委、引文作者一并致谢!

References

- Bone Y. 1988. The geological setting of tourmalinite at rum-Jungle, Nt, Australia—genetic and economic implications [J]. *Mineralium Deposita*, 23(1): 34~41.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements meteorite studies [A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Franco P. 1992. The FeO/(FeO+MgO) ratio of tourmaline: a useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal mineral deposits [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 42: 371~381.
- Griffin W L, Slack J F, Ramsden A R, *et al.* 1996. Trace elements in tourmaline from massive sulfide deposits and tourmalinites; geochemical controls and exploration applications [J]. *Economic Geology*, 91: 657~675.
- Gromet L P, Dymek R F, Haskin LA, *et al.* 1984. The “North American shale composite”: its compilation, major and trace elements characteristics [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 2469~2482.
- 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.
- Huang Longhui, Hu Tinghui, Zeng Zhaoguang, *et al.* 2007. Elaboration on the ages of magmatic rock in Chongjiang and its neighboring area of Guizhou [J]. *Guizhou Geology*, 24(2): 122~125 (in Chinese with English abstract).
- Qi L, Jing H and Grgoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *TALANTA*, 51(3): 507~513.
- Liao Zhongli, Mo Xuanxue, Pan Guifang, *et al.* 2007. Mineral chemistry and its petrological implications in tourmaline of the peraluminous granites, South Tibet [J]. *Geoscience*, 21(2): 291~296 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun. 1993. Tourmalinite—a latency exploration symbol for Au, W and base metal sulfide deposits [J]. *Mine Exploration*, 22~28 (in Chinese).
- Palmer M R and Slack J F. 1989. Boron isotopic composition of tourmalines from massive sulfide deposits and tourmalinites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103: 434~451.
- Pan Zhaolu, Zhao Aixing and Pan Tiehong. 1984. *Crystallography and Mineralogy* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Plimer I R. 1988. Tourmalinites associated with Australian Proterozoic submarine exhalative ores [A]. Friedrich G H and Herzog P M. *Base Metal Sulfide Deposits* [C]. Berlin Heidelberg: Springer, 255~283.
- Pirajno F and Smithies R H. 1992. The FeO/(FeO+MgO) ratio of tourmaline: a useful indicator of spatial variations in granite-related hydrothermal mineral deposits [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 42(2~3): 371~381.
- Shen Jianzhong and Han Fa. 1992. Tourmalinite: a mineralization-related rock type [J]. *Mineral Deposits*, 11(4): 384~388 (in Chinese with English abstract).
- Slack J F, Herriman N, Barnes R G, *et al.* 1984. Stratiform tourmalinites in metamorphic terranes and their geologic significance [J]. *Geology (Boulder)*, 12: 713~716.
- Sun S S and McDonough S M. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and process [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Tan Yunjin. 1987. Tourmaline in granitoid and its relationship Sn deposits: geology and geochemistry [J]. *Foreign Granitoid Geology and Mineral*, (4): 1~11 (in Chinese).
- Wang Denghong and Chen Yuchuan. 1996. A preliminary study on the composition and origin of tourmalines in Dachang, Guangxi [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(3): 280~287 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinjun and Zhao Feng. 2002. Relation between tourmaline chemical feature and related deposit [J]. *Geologic Prospecting Analysis*, 17(3): 161~164 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pu, Pan Zhaolu, Weng Linghao, *et al.* 1984. *System Mineralogy* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 159~162 (in Chinese).
- Xia Xuehui. 1995a. Sedimentogenic tourmaline rock suggestive of hot water deposition responsible for the pyrite deposits in Fengcheng region of Liaoning: Discovery and implication [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 17(3): 191~197 (in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui. 1995b. The REE of sedimentogenic tourmaline rock [J]. *Geology—Geochemistry*, 6: 57~59 (in Chinese).
- Xia Xuehui. 1997. H, O and Si isotope geochemistry of tourmalinite in massive sulfide deposit from east Liaoning rift [J]. *Acta Geoscientifica Sinica*, 18(sup.): 214~216 (in Chinese with English abstract).
- Yang Dezhì, Zhou Jiāxi, Wang Jinsong, *et al.* 2009. The primary exploration of ore-forming regularity Congjiang Zaibian polymetal ore deposits areas, Guizhou [A]. The twelfth proseminar Collected papers of the society of MRG [C], Guiyang, 237 (in Chinese).
- Yang Ruzeng and Xu Lixin. 2007. Relationship between chemical component of tourmaline and its crystal lattice parameter [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 35(10): 1425~1429 (in Chinese with English abstract).

- Ye Song, Zhu Qinwen, Zhong Zengqiu, *et al.* 1997. The study of tourmaline and haylourmalinite in copper deposit Zhongtiaoshan, Shanxi province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 160~169(in Chinese with English abstract).
- Zeng Wen, Zhou Hanwen, Zhong Zengqiu, *et al.* 2005. Single zircon U—Pb ages and their tectonic implications of Neoproterozoic magmatic rocks in southeastern Guizhou, China[J]. *Geochemistry*, 34(6): 548~556(in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaoguang, Liu Ling, Shu Yongkuan, *et al.* 2003. A discovery of the mesoproterozoic and neoproterozoic volcanic rocks in the Zhaibian—Gaowu areas, Guizhou and its implication[J]. *Guizhou Geology*, 20(3): 135~138(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 黄隆辉, 胡廷辉, 曾昭光, 等. 2007. 贵州从江及比邻地区岩浆岩形成时代探讨[J]. *贵州地质*, 24(2): 122~125.
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 等. 2007. 藏南过铝花岗岩中电气石的矿物化学特征及成因意义[J]. *现代地质*, 21(2): 291~296.
- 聂凤军. 1993. 电气石岩—层状金、钨和贱金属硫化物矿床的潜在找矿标志[J]. *找矿勘探*, 22~28.
- 潘兆橧, 赵爱醒, 潘铁虹. 1994. *结晶学及矿物学*[M]. 北京: 地质出版社.
- 沈建忠, 韩发. 1992. 电气石岩——一种和矿化有关的岩石类型[J]. *矿床地质*, 11(4): 384~388.
- 谭运金. 1987. 花岗岩类及有关锡矿床中电气石的地质地球化学[J]. *国外花岗岩类地质与矿产*, (4): 1~11.
- 王登红, 陈毓川. 1996. 广西大厂电气石的成分与成因初探[J]. *岩石矿物学杂志*, 15(3): 280~287.
- 王进军, 赵枫. 2002. 电气石的化学成分与相关矿床的关系[J]. *地质找矿论丛*, 17(3): 161~164.
- 王濮, 潘兆橧, 翁玲宝, 等. 1984. *系统矿物学(中册)*[M]. 北京: 地质出版社, 159~162.
- 夏学惠. 1995a. 凤城地区硫铁矿床中热水沉积电气石的发现及其找矿意义[J]. *化工矿产地质*, 17(3): 191~197.
- 夏学惠. 1995b. 热水沉积电气石岩稀土元素地球化学特征[J]. *地质地球化学*, 6: 57~59.
- 夏学惠. 1997. 辽东裂谷块状硫化物矿床中电气石岩的H、O和Si同位素地球化学[J]. *地球学报(增刊)*, 18: 214~216.
- 杨德智, 周家喜, 王劲松, 等. 2009. 贵州从江宰便多金属矿区成矿规律初探[A]. *中国矿物岩石地球化学第12届学术年会论文集*[C]. 贵阳, 237.
- 杨如增, 徐礼新. 2007. 电气石的化学成分与其晶格常数的关系[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 35(10): 1425~1429.
- 叶松, 朱勤文, 钟增球, 等. 1997. 山西省中条山铜矿田电气石与电气石岩的研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 16(2): 160~169.
- 曾雯, 周汉文, 钟增球, 等. 2005. 黔东南新元古代岩浆岩单颗粒锆石U—Pb年龄及其构造意义[J]. *地球化学*, 34(6): 548~556.
- 曾昭光, 刘灵, 舒永宽, 等. 2003. 贵州宰便—高武地区中新元古代火山岩的发现及其意义[J]. *贵州地质*, 20(3): 135~138.