

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.014

桂北摩天岭岩体电气石矿物学特征及其对 岩浆-热液演化示踪

周心怡¹, 王凯兴^{1*}, 刘晓东², 朱坤贺¹, 吴昆明³, 史竟存¹

ZHOU Xin-Yi¹, WANG Kai-Xing^{1*}, LIU Xiao-Dong², ZHU Kun-He¹,
WU Kun-Ming³, SHI Jing-Cun¹

1. 东华理工大学, 江西 南昌 330013; 2. 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;

3. 核工业二三〇研究所, 湖南 长沙 410007

1. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. State Key Laboratory of
Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

3. No. 230 Research Institute of Nuclear Industry, Changsha 410011, Hunan, China

摘要: 摩天岭岩体是华南地区与铀矿相关的最古老花岗岩之一, 其岩浆期后流体特征及性质研究尚不充分, 限制了对其成矿机制的深入理解。电气石可为研究岩浆-热液作用提供重要线索, 本研究通过电子探针分析、激光原位分析等方法, 结合主成分分析, 对摩天岭岩体中的电气石开展系统研究。结果显示, 摩天岭岩体中的电气石分为三种类型: 岩浆晚期的浸染状电气石(Tur-1)、岩浆热液转换阶段的石英-电气石囊型(Tur-2)和热液阶段的电气石-石英脉型(Tur-3), 且具有明显的主量元素聚类特征, 绝大多数为黑电气石。研究表明, 从 Tur-1 到 Tur-3, 电气石的形成环境由岩浆向热液转变, Tur-2 可能记录了这一演化过程, V、Co 等元素含量的进一步增加也暗示岩浆经历了持续的分异演化, 不同类型的电气石反映了岩浆体系流体活动的增强及阶段的转变。同时, 摩天岭地区的岩浆-热液流体活动对区内铀矿(如新村、达亮铀矿床)和锡矿(九峰锡矿床)的形成具有重要意义, 挥发组分的存在不仅增强了岩浆对铀的富集能力, 还进一步提升了摩天岭主体花岗岩中铀的含量, 为岩体内晶质铀矿的形成提供了丰富的物质基础。当摩天岭花岗岩岩浆演化至晚期时, 会分泌出富含 F 和 B 的流体, 这为锡成矿提供了热源和富 Sn-F-B 的流体, 从而为矿床的形成提供充足的成矿物质。

关键词: 电气石; 元素替换; 主成分分析; 岩浆-热液演化; 摩天岭

中图分类号: P578.953; P574.2

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0407-14

Zhou X Y, Wang K X, Liu X D, Zhu K H, Wu K M and Shi J C. 2025. Mineralogy of Tourmaline in the Motianling Pluton, North Guangxi: Insights into Magmatic-hydrothermal Evolution. *South China Geology*, 41(2): 407–420.

Abstract: The Motianling pluton is one of the oldest uranium-related granites in southern China. However, the characteristics and properties of its post-magmatic fluid have not yet been sufficiently studied, which limits the in-depth understanding of its mineralization mechanism. Tourmaline can provide important clues for investigating magma-hydrothermal processes. In this study, systematic research was conducted on

收稿日期: 2025-03-19; 修回日期: 2025-04-17

基金项目: 中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目(2023NRE-LH-01)、中国核工业地质局高校科研攻关项目(201619)

第一作者: 周心怡(2000—), 女, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: 876561645@qq.com

通讯作者: 王凯兴(1985—), 男, 副教授, 从事热液铀矿床成因研究, E-mail: xy2gmo02@ecit.cn

tourmaline from the Motianling rock mass using electron probe microanalysis, in-situ laser ablation analysis, and principal component analysis. The results show that the tourmaline in the Motianling rock mass can be classified into three types: disseminated tourmaline (Tur-1) formed during the late magmatic stage, quartz-tourmaline aggregates (Tur-2) formed during the magmatic-hydrothermal transition stage, and tourmaline-quartz veins (Tur-3) formed during the hydrothermal stage. These tourmalines exhibit distinct clustering features in major elements, with the vast majority being schorl. The study indicates that from Tur-1 to Tur-3, the formation environment of tourmaline transitions from magmatic to hydrothermal, with Tur-2 potentially recording this evolution process. The further increase in elements such as V and Co also suggests continuous fractional crystallization of the magma. The different types of tourmaline reflect the intensification of fluid activity and stage transition within the magmatic system. Meanwhile, the magmatic-hydrothermal fluid activity in the Motianling area plays a significant role in forming local uranium deposits (e.g., Xincun and Daliang uranium deposits) and tin deposits (e.g., Jiufeng tin deposit). The presence of volatile components not only enhances the magma's ability to enrich uranium but also further increases the uranium content in the main granitic body of Motianling, providing a substantial material basis for the formation of uraninite with the rock mass. When the Motianling granitic magma evolved to its late stage, it exsolved fluids rich in F and B, which provide both the heat source and Sn-F-B-enriched fluids essential for tin mineralization, thus offering sufficient ore-forming materials for the formation of the deposit.

Key words: tourmaline; element replacement; Principal Component Analysis (PCA); magma-hydrothermal evolution; Motianling

电气石作为一种典型的复杂含硼硅酸盐矿物, 不仅广泛分布于火成岩、沉积岩、变质岩(蒋少涌等, 2000; 郭佳等, 2020; 唐攀等, 2024), 也常出现在不同成因的热液环境下(Harlaux et al., 2020; Codeço et al., 2021)。研究表明, 电气石的结晶作用既可在岩浆活动阶段发生, 也可通过后期热液交代作用在已固结的岩体中形成(唐攀等, 2024)。复杂的内部结构、多样的离子替代关系以及较高的化学稳定性使其能够有效保存原始化学组分和同位素信息, 完整记录岩浆和热液过程中的地质信息, 为成岩和成矿条件的研究提供了重要依据(Zhao K H et al., 2019; 李真真, 2020; 王臻等, 2022; Wu H H et al., 2024; 郭伟康等, 2025; Li L G et al., 2025)。

摩天岭岩体位于扬子板块与华夏板块结合部的西南端, 是桂北乃至整个华南地区最古老的含铀花岗质岩体之一, 同时也是江南造山带西南段出露面积最大的岩体之一。摩天岭岩体及周缘产出有铀矿床(如达亮铀矿床)和锡矿床(如九峰锡矿床), 其形成与演化备受地质学家们的关注。长

期以来, 众多学者对摩天岭岩体开展了大量研究工作, 涉及元素地球化学特征和迁移规律、地质年代学、构造环境、成因机制及其与铀和锡元素成矿关系等方面(李献华等, 1999; 邹明亮等, 2011; Qiu L et al. 2018; 陈峰等, 2019; 徐争启等, 2019; Li S S et al., 2020; 秦亚等, 2021; 叶凡琛等, 2024)。与诸多成锡花岗岩相似, 摩天岭花岗岩内广泛发育岩浆期后流体活动(Qiu L et al., 2018; Zhu K H et al., 2024)。然而, 针对岩浆期后流体的特征及性质的研究却相对匮乏, 这在一定程度上限制了对摩天岭岩体形成、演化以及区内元素成矿机制的认识。

本文以摩天岭岩体中不同产状的电气石为研究对象, 开展岩相学和地球化学特征研究, 利用电子探针和激光剥蚀等离子体质谱系统测定三种不同产状电气石的化学组成, 并结合主成分分析的方法, 通过揭示电气石化学成分的变化规律, 初步查明了不同类型电气石的成因, 并深入探讨其化学组成对岩浆热液演化过程的指示意义, 从而为摩天岭地区的矿产勘查工作提供理论依据。

1 地质概况

摩天岭岩体位于江南造山带西南缘的扬子板块西南部的九万大山隆褶带之复合部位。研究区出露的地层主要包括中元古界四堡群和新元古界丹洲群。研究区地质构造演化过程极为复杂, 自中元古代以来, 受多次构造活动影响, 其中四堡

期、加里东期、印支期和燕山期的构造运动尤为强烈。区内断裂构造发育显著, 构造线方向以北北东向为主。主要发育四条北东向断裂, 从西向东依次为麻木岭断裂、梓山坪断裂、高武断裂和乌指山断裂, 其中高武断裂带规模最大。研究区内岩浆岩分布广泛, 主要出露中元古代及新元古代侵入岩和火山岩(图 1)。摩天岭岩体侵入于由四堡群组成的三防复式背斜核部, 呈不规则椭圆

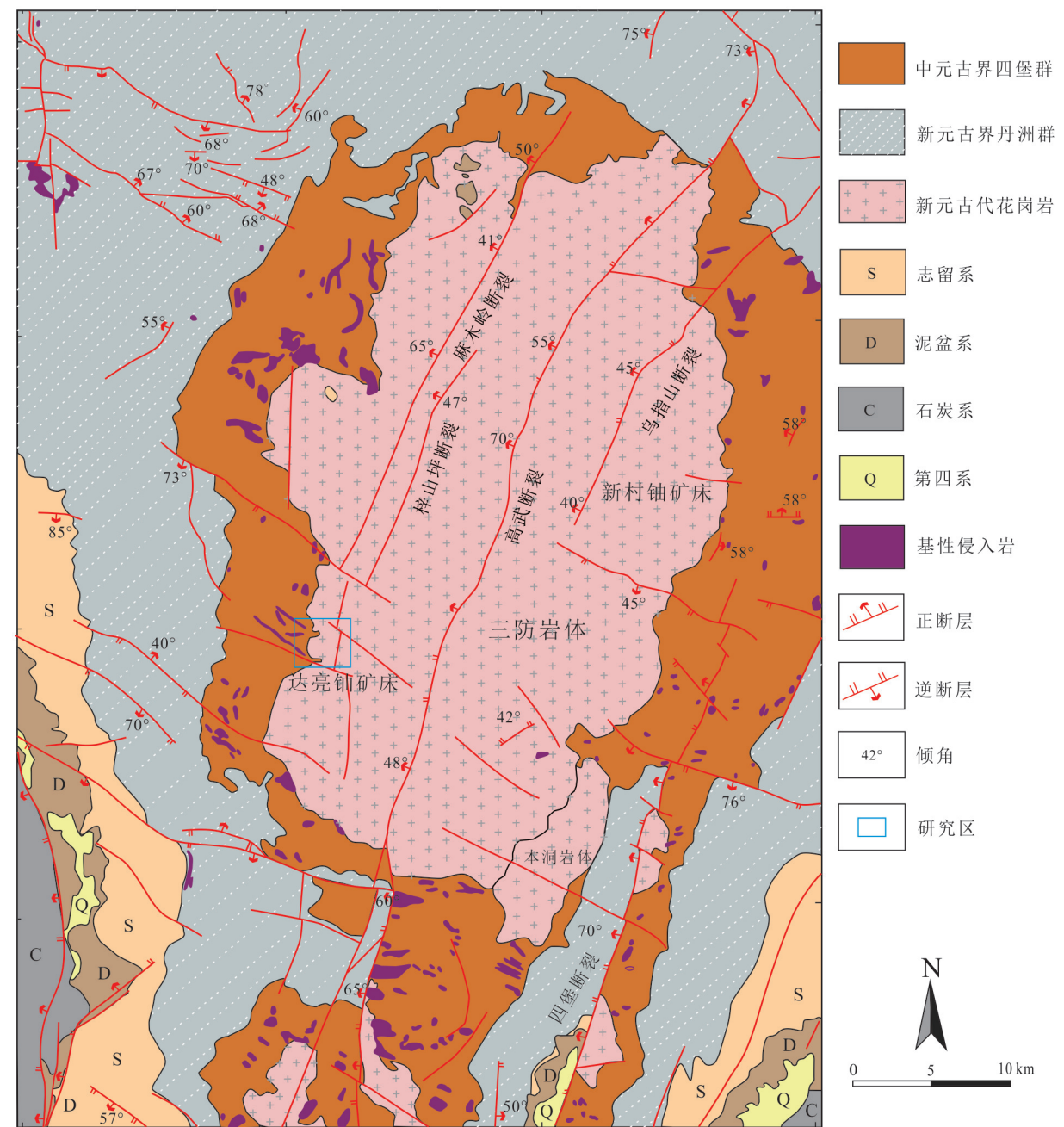


图 1 摩天岭岩体地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Motianling area in Northern Guangxi

据 Qiu L et al(2018)修改

状产出, 出露面积约 955.3 km², 岩性整体较为单一, 依据粒度可划分为粗粒、中粒和细粒黑云母花岗岩, 分带清晰, 可分为内部相、过渡相和边缘相, 锆石 U-Pb 定年结果显示, 其形成时代为 835 ~ 790 Ma (宋昊等, 2015), 属新元古代。摩天岭岩体遭受了后期断裂构造的叠加与改造, 岩石多具片麻状构造和碎裂结构, 为韧性剪切作用的产物。岩体蚀变作用强烈, 普遍发育白云母-绢云母化、电气石化、电英岩化, 局部还可见云英岩化、硅化等多种热液蚀变现象。

2 样品与分析方法

2.1 样品特征

本次研究的样品取自摩天岭地区达亮铀矿床钻孔 ZK1129-1, 岩性为灰白色似斑状电气石黑云母花岗岩, 发育石英和钾长石斑晶, 主要矿物为石英(约 30%)、钾长石(约 35%)、斜长石(约 22%)和黑云母(约 10%), 特征矿物电气石(约 2%), 副矿物包括锆石、磷灰石和独居石等(图 2a)。研究中选取不同样品中合适区域进行取样和制片, 对电气石开展显微观察和成分分析。依据电气石产出形态及其共生矿物的组合关系, 摩天岭地区电气石可分为三种。

1) 浸染状电气石(Tur-1): 在光学显微镜下观察, 电气石呈半自形浸染状, 分布在石英、钾长石和斜长石等造岩矿物之间, 粒径较小, 偶尔可见其呈他形交代早期造岩矿物, 具有黄棕到浅黄色多色性, 无明显环带, 在 BSE 电子图像下成分均匀(图 2b、2c); 2) 石英-电气石囊(Tur-2): 白云母充填于石英与电气石晶粒间, 形态不规则且粒径较大。电气石呈半自形-自形柱状与石英共生, 交代早期的钾长石、斜长石和云母等矿物(图 2d、2e、2f); 3) 电气石-石英脉型(Tur-3): 在光学显微镜下, 可见电气石呈放射状或簇状, 长柱状电气石被石英包围, 粒径通常较大, 呈长柱状定向排列, 具有棕黄到蓝绿色多色性, 在 BSE 电子图像下成分不均匀(图 2g、2h、2i)。

2.2 分析方法

2.2.1 电子探针分析

电气石电子探针成分测试(EPMA)在东华理

工大学核资源与环境重点实验室测试完成。仪器型号为 JXA-8100, 工作条件: 加速电压 15 kV, 电流为 2.00×10^{-8} A, 束斑直径小于 5 μm 。相关测试元素及其所采用的标样分别为: Na(硬玉)、Fe(赤铁矿)、K(透长石)、Mg(橄榄石)、Mn(蔷薇辉石)、Ca(磷灰石)、Al(硬玉)、Ti(金红石)、P(磷灰石)、Si(石英)、Cl(硅铍铝钠石)、F(氟石)。

2.2.2 LA-ICP-MS 原位微区微量元素分析

电气石的激光原位微量元素测试分析在南京聚谱检测科技有限公司利用 LA-ICP-MS 测试完成。193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统由 Teledyne Cetac Technologies 制造, 型号为 Analyte Excite。四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)由安捷伦科技(Agilent Technologies, 美国)制造, 型号为 Agilent 7700x。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于电气石表面, 能量密度为 4.5 J/cm², 束斑直径为 40 μm , 频率为 6 Hz, 共剥蚀 40 s, 剥蚀气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。采用美国地质调查局熔融玻璃(USGS BIR-1G、BHVO-2G、BCR-2G)作为外标。原始的测试数据经 ICP-MS DataCal 软件离线处理, 采用“无内标-基体归一法”对元素含量进行定量计算(Liu Y S et al., 2008)。

2.2.3 主成分分析

本文通过主成分分析对摩天岭地区花岗岩中电气石的主量元素进行分析。主成分(Principal Component Analysis, PCA)是一种无监督的线性降维算法, 其核心在于将大量相关变量转换为少量不相关变量, 并同时保留原始数据集中的重要信息(Greenacre et al., 2022)。主成分分析通过提取主成分(principal component, PC)实现降维处理, 这些主成分是原始变量的线性组合, 依据其方差贡献递减排序: 第一个主成分(PC1)解释最大方差, 而第二个主成分(PC2)次之且与第一个主成分(PC1)正交, 以此类推(Geladi et al., 1989; Grahn and Geladi, 1996)。根据相关研究, PCA 因子载荷反映了原始变量与主成分之间的相关性, 用以衡量变量在主成分中的贡献, 可用于评估特定变量(如矿物丰度)对主成分的影响(Geladi et al., 1989; Grahn and Geladi, 1996)。因子载荷的正负

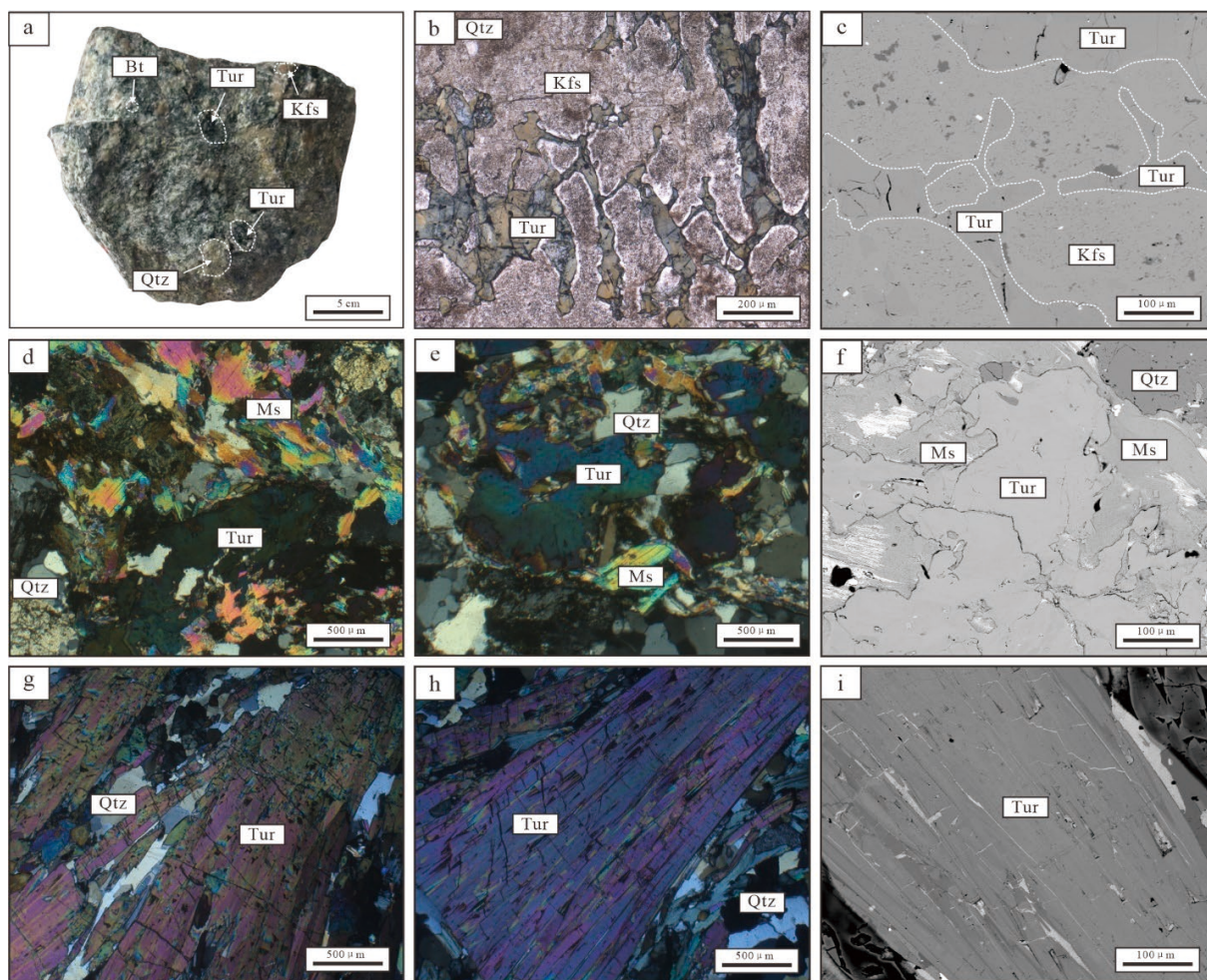


图 2 摩天岭地区花岗岩手标本照片以及不同产状电气石代表性显微照片

Fig. 2 Hand specimen photos of granite in Motianling area and representative micrographs of tourmaline with different occurrences

- a. 灰白色似斑状电气石黑云母花岗岩; b. 电气石(Tur-1)呈浸染状与长石、石英共生; c. 电气石(Tur-1)在 BSE 电子图像下无明显分带;
d. 电气石(Tur-2)分布于云英岩化带附近; e. 白云母充填于电气石与石英颗粒之间; f. BSE 电子图像下电气石(Tur-2)与白云母、
石英共生; g. 电气石(Tur-3)与石英共生, 呈定向排列; h. 电气石(Tur-3)呈放射状; i. BSE 电子图像下电气石(Tur-3)

成分不均一; Bt-黑云母; Qtz-石英; Kfs-钾长石; Tur-电气石; Ms-白云母

号揭示了变量之间的相关性,并可通过系数图(如 PC1 与 PC2)直观展示。PCA 得分则表示每个样品在主成分上的综合值。在本研究中,PCA 用于降低数据维度,揭示变量之间隐藏的相关性,并识别有助于对摩天岭地区电气石进行分类的关键变量。

3 分析结果

3.1 电气石主量元素

Henry et al. (2011) 提出电气石晶体理想化学通式为 $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO)_3V_3W$, 在该通式中,元素替代主要在 X、Y 和 W 位置发生,具体而言,X 位置可被 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 和空位($X_\square$)占据;Y 位置则

可被 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Li^+ 、 Fe^{3+} 和 Cr^{3+} 填充;W 位置则主要被 F^- 、 OH^- 和 O^{2-} 占据;在 Z、T、V 位置上替代较少,Z 位置可被 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 占据,T 位置主要由 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 B^{3+} 充填,V 位置为 O^{2-} 、 OH^- 。本文基于上述理想分子式计算电气石的分子式,并以 31 个阴离子(O, OH, F)为基准, $B_2O_3^*$ 和 H_2O^* 含量根据 $B=3$ 和 $OH+F+Cl=4$ 的条件分别计算获得(Henry et al., 1996),利用 $[Li=15-(T+Z+Y)$ 阳离子总] 计算 Li 的 apfu 值(Tindle et al., 2002)。鉴于电子探针分析无法区分 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} , 本文采用待定阳离子法来计算电气石中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 含量(林文蔚和彭丽君, 1994)。电气石主量元

素的测试结果及计算之后的结构分子式见表 1。中, SiO₂ 含量为 34.44~35.50 wt.%, Al₂O₃ 含量为 32.41~33.91 wt.%, FeO^T 含量为 13.57~14.31 wt.%, 总体上, 浸染状电气石(Tur-1)成分相对较集

表 1 摩天岭黑云母花岗岩中电气石电子探针分析数据及离子计算结果 (wt. %)

Table 1 Microprobe data and ion calculation(wt. %) of tourmaline from the Motianling biotite granite									
类型	Tur-1(n=12)			Tur-2(n=12)			Tur-3(n=12)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
SiO ₂	35.50	34.44	35.12	35.06	34.40	34.76	36.42	35.86	36.10
TiO ₂	0.42	0.11	0.18	1.00	0.28	0.67	0.50	0.18	0.38
Al ₂ O ₃	33.91	32.41	33.46	31.38	29.86	30.48	33.71	32.14	32.79
Cr ₂ O ₃	0.04	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	0.04	0.00	0.01
FeO ^T	14.31	13.57	13.96	14.57	13.51	14.11	13.20	12.31	12.79
MgO	2.09	1.19	1.40	1.63	1.29	1.46	3.12	1.95	2.53
CaO	0.44	0.03	0.10	0.10	0.05	0.08	0.42	0.04	0.14
MnO	0.20	0.11	0.17	0.18	0.10	0.14	0.13	0.07	0.09
Na ₂ O	1.81	1.46	1.63	1.95	1.64	1.81	1.86	1.59	1.72
K ₂ O	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.01	0.02
F	0.09	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	0.09	0.00	0.01
Cl	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
H ₂ O*	3.61	3.51	3.58	3.50	3.44	3.47	3.66	3.58	3.63
B ₂ O ₃ *	10.47	10.30	10.39	10.13	10.00	10.07	10.60	10.48	10.53
O=F	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
Total*	100.74	99.73	100.22	98.09	96.61	97.27	101.56	100.42	100.92
根据31个阴离子(O, OH, F)计算									
T-Site									
Si	5.90	5.81	5.87	6.03	5.96	6.00	5.98	5.92	5.96
Al	0.19	0.10	0.13	0.04	0.00	0.01	0.08	0.02	0.04
B	3	3	3	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Y-Site									
Al	0.56	0.26	0.47	0.37	0.08	0.20	0.47	0.24	0.34
Ti	0.05	0.01	0.02	0.13	0.04	0.09	0.06	0.02	0.05
Cr	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.24	0.22	0.23	0.25	0.23	0.24	0.22	0.20	0.21
Mg	0.53	0.30	0.35	0.42	0.33	0.37	0.76	0.48	0.62
Mn	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
Fe ²⁺	1.76	1.67	1.72	1.86	1.71	1.79	1.61	1.50	1.55
Li*	0.22	0.17	0.19	0.35	0.23	0.28	0.24	0.18	0.21
Z-Site									
Al	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
X-Site									
Ca	0.08	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.07	0.01	0.02
Na	0.59	0.47	0.53	0.66	0.55	0.60	0.60	0.51	0.55
K	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
X□	0.51	0.32	0.45	0.43	0.32	0.37	0.48	0.36	0.42
V+W-Site									
OH	4.00	3.95	3.99	4.00	3.97	3.99	4.00	3.95	3.99
F	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01
Cl	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na/(Na+Ca)	0.99	0.88	0.97	0.98	0.97	0.98	0.99	0.88	0.96
Fe/(Fe+Mg)	0.85	0.77	0.83	0.84	0.81	0.83	0.76	0.66	0.71
Fe/Mg	5.80	3.33	5.04	5.24	4.34	4.81	3.24	1.97	2.53

注: 结构式基于31个阴离子(O,OH,F). B₂O₃和H₂O按化学计量计算, B=3 apfu, OH+F=4 apfu; Li*=[15-(T+Z+Y)总阳离子]计算; Total*含量在上述计算结果基础上计算获得.

Na_2O 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO 和 CaO 等含量较少(分别为 1.46~1.81 wt.%, 1.19~2.09wt.%, 0.11~0.42 wt.%, 0.11~0.20 wt.% 和 0.03~0.44 wt.%), Cr_2O_3 、 K_2O 等元素含量低, 部分低于检测限。石英-电气石囊(Tur-2)中 SiO_2 、 FeO^{T} 、 MgO 和 Na_2O 含量与浸染状电气石(Tur-1)相似(含量分别为 34.40~35.06 wt.%, 13.51~14.57 wt.%, 1.29~1.63 wt.% 和 1.64~1.95 wt.%), 但 Al_2O_3 含量略低(含量 29.86~31.38 wt.%)。电气石-石英脉型(Tur-3)具有相对较高的 MgO 、 SiO_2 含量(分别为 1.95~3.12 wt.%, 35.86~36.42 wt.%) 和略低的 FeO^{T} 含量(12.31~13.20 wt.%)。不同产状电气石 Al_2O_3 、 FeO^{T} 、 MgO 、 Na_2O 含量较高且变化较大, 而 TiO_2 、 CaO 和 K_2O 含量总体较低且变化小, F 、 Cl 含量多数低于检测限。且不同产状电气石 Ti 、 Mn 、 Ca 、 Na 、 K 等元素差异不大, Si 、 Al 、 Fe 和 Mg 存在着较大差异。

根据电气石晶体结构中 X 位置上阳离子 $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+), \text{Ca}^{2+}]$ 和空位占位情况, 可划分为碱基电气石、钙基电气石和碱缺位型电气石。在 $\text{Ca-X}\square-(\text{Na}+\text{K})$ 图中, 摩天岭岩体中不同类型的电气石均属于碱基电气石(图 3a); 在黑电气石-镁电气石-锂电气石三角分类图(Henry et al., 2011)中, 所有数据点均集中分布于黑电气石区域(图 3b); 在 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})-\text{X}\square/(\text{X}\square+\text{Na}+\text{K})$ 的判别图解中, 所测电气石样品主要集中在黑电气石区域(图 3c)。

3.2 电气石微量元素

电气石 LA-ICP-MS 微量元素的分析结果列于表 2。整体上, 电气石具有低的 Cu ($\leq 0.88 \times 10^{-6}$)、 Pb ($\leq 10.14 \times 10^{-6}$)、 Zr ($\leq 1.89 \times 10^{-6}$)、 Hf ($\leq 0.44 \times 10^{-6}$)、 $\sum \text{REE}$ ($\leq 20.60 \times 10^{-6}$)、 W ($\leq 1.15 \times 10^{-6}$)、 Th ($\leq 0.71 \times 10^{-6}$) 和 U ($\leq 1.69 \times 10^{-6}$) 含量, Li 、 Be 、 V 、 Sc 和 Sn 等元素含量变化较大, 分别为 $76.23 \times 10^{-6} \sim 452.68 \times 10^{-6}$ 、

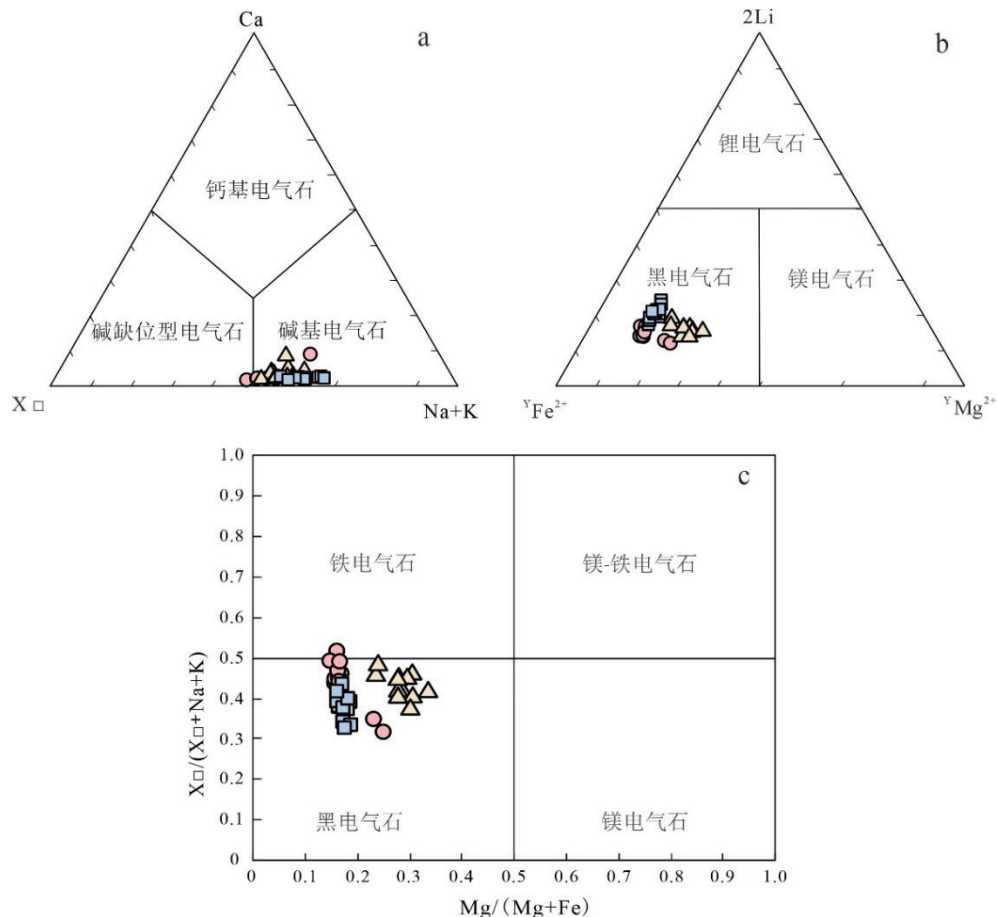


图 3 摩天岭地区不同产状电气石分类图解

Fig. 3 Classification diagram of tourmaline in different occurrences in Motianling area

a. $\text{Ca-X}\square-(\text{Na}+\text{K})$ 三元图解; b. $2\text{Li-Fe}^{3+}\text{-Mg}^{2+}$ 三元图解; c. $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})-\text{X}\square/(\text{X}\square+\text{Na}+\text{K})$ 分类图解. 底图据 Henry et al. (2011); 图例同图 3

1.68×10⁻⁶ ~ 110.53×10⁻⁶、9.00×10⁻⁶ ~ 72.52×10⁻⁶、Nb、Ta、Be、Li、V 和 Sr 含量,中等的 Zn 含量。石
4.76×10⁻⁶~188.18×10⁻⁶ 和 2.96×10⁻⁶~162.06×10⁻⁶。英-电气石囊(Tur-2)与浸染状电气石具有相似的
如图 4 所示,浸染状电气石(Tur-1)具有低的 Co、Sr 含量,但前者具有较高的 V、Co、Sc、Li、Be 含

表 2 摩天岭黑云母花岗岩中电气石微量元素分析结果 (×10⁻⁶)

Table 2 Summary of traceelements (×10⁻⁶) of tourmaline from the Motianling biotite granitic pluton

类型	Tur-1(n=9)			Tur-2(n=10)			Tur-3(n=10)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
Li	127.01	76.23	96.45	452.68	100.45	263.34	108.61	91.50	103.09
Be	4.23	1.68	3.09	110.53	4.42	43.47	10.99	4.07	7.13
V	52.42	9.00	17.42	53.98	10.92	31.59	72.52	34.94	57.72
Sc	27.21	4.76	9.04	188.18	31.77	94.85	18.17	7.86	12.87
Co	7.27	0.11	1.59	8.22	1.37	4.32	15.98	8.44	13.43
Zn	343.27	282.78	307.92	1511.13	249.26	805.85	270.64	197.86	237.28
Ni	11.90	0.14	2.06	7.10	1.86	4.34	8.81	3.22	7.07
Cu	0.86	0.00	0.24	6.73	0.00	1.79	0.88	0.00	0.35
Ga	74.48	51.49	60.10	510.37	83.38	249.91	61.16	47.52	53.89
Rb	0.12	0.00	0.04	4.32	0.03	0.76	1.21	0.00	0.13
Sr	18.22	1.65	4.76	8.89	0.61	3.96	34.03	13.66	22.10
Y	0.57	0.02	0.15	1.28	0.00	0.46	1.55	0.13	0.35
Nb	0.87	0.15	0.48	69.03	0.41	21.71	12.21	1.80	6.01
Ta	0.88	0.15	0.55	71.49	0.88	33.08	10.72	1.38	4.71
Zr	0.26	0.03	0.09	1.89	0.04	0.44	1.63	0.15	0.85
Hf	0.07	0.00	0.02	0.44	0.01	0.11	0.25	0.00	0.11
Sn	6.88	2.96	4.30	162.06	3.49	47.01	76.38	17.03	41.73
W	0.10	0.00	0.04	0.57	0.00	0.18	1.15	0.07	0.41
Pb	3.07	0.98	1.73	10.14	1.20	4.42	5.83	2.77	4.16
Th	0.03	0.00	0.01	0.71	0.00	0.11	0.30	0.00	0.09
U	0.02	0.00	0.00	1.69	0.00	0.18	0.03	0.00	0.01
ΣREE	10.23	1.00	2.55	20.60	1.09	5.27	17.65	0.99	7.07

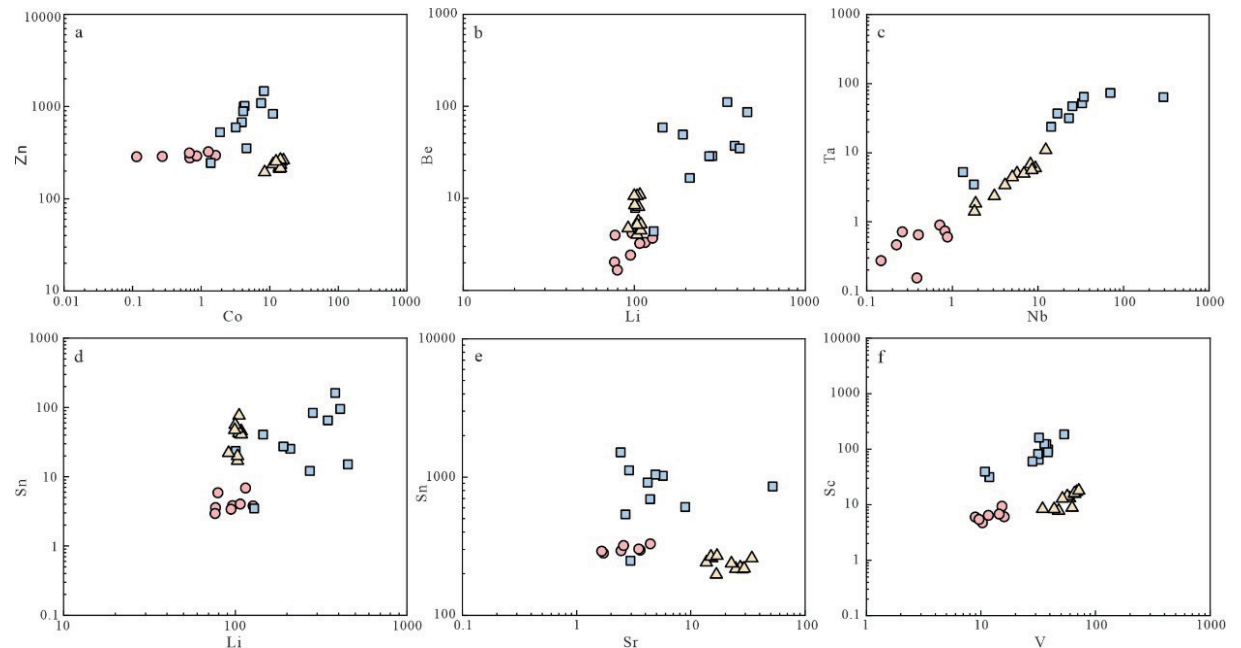


图 4 摩天岭黑云母花岗岩中电气石微量元素 (×10⁻⁶) 变化图解

Fig. 4 Trace element (×10⁻⁶) variation diagrams for tourmaline from the MoTianling biotite granitic pluton

图例同图 3

量, 石英脉型电气石(Tur-3)具有高的 Co、Sr 含量。

3.3 电气石 PCA 结果

基于主量元素分析计算出的主成分分析(PCA)序列显示, 第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)能够有效代表整个数据集, 以百分比形式直观地呈现对原始数据降维后保留的信息量, 并且可以清晰地区分样品中不同类型的电气石(图 5)。第一主成分(PC1)能解释所有主量元素数据 57.8% 的总方差, 是数据中最主要的变异方向, 即不同类型电气石在 PC1 方向上的元素差异最显著。第二主成分(PC2)解释 23.2% 的总方差, 是次重要的变异方向, 和 PC1 正交(无相关性)。 t_1 、 t_2 分别代表样本在 PC1、PC2 轴上的“得分投影”, 其背后的方差贡献本质与 PC1、PC2 保持一致, 这是由于样本得分的方差是由主成分方差所决定的。例如, t_1 轴的变异主要由 PC1(57.8%)主导; t_2 轴的变异则由 PC2(23.2%)主导。在图 5a 中, 不同类型电气石于主成分空间的分布得以直观体现— t_1 轴区分电气石的“主要差异”(PC1 方向)、 t_2 轴区分“次要差异”(PC2 方向), 从而有助于对电气石的聚类情况进行观察。在 PCA 双标图中, 不同电气石样品的特征元素富集特征清晰: 例如, Tur-1 样品富集 Al, Tur-2 样品富集 Fe、K 和 Na, 而 Tur-3 样品富集 Mg 和 Si(图 5b)。电气石的 PCA 结果呈现出明显的聚类特征, 可将浸染状三种类

型的电气石脉区分开。

4 讨论

4.1 电气石化学成分置换机制

电气石由于复杂的晶体结构而具有广泛的类质同象现象, 这些替代作用主要集中在 X、Y 和 W 位置 (Buriánek and Novák, 2007; Henry and Dutrow, 2012)。从电气石的 Mg-Fe 二元图(图 6a)中可以看出, Mg 与 Fe 呈现显著的负相关, 表明 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 在 Y 位置的相互替代是影响电气石成分变化的关键因素。在总 Al-X 图解(图 6b)中, 电气石的 X 与 Al 呈现出正相关关系, 这表明在 Y 位置 Al 主要通过 X, $\text{Al}(\text{Na}, \text{R}^{2+})_{-1}$ 的替代机制进入电气石的晶格结构。同时, 在总 Al-总 Fe 和总 Fe-X 二元图解中, 不同类型的电气石均显示出 X 和 Fe 之间的显著负相关关系(图 6c、6d), 这说明 Al 通过 $\text{Na}, \text{Fe}^{2+}(\text{X}, \text{Al})_{-1}$ 的替代机制进入 Y 位置。

因此, 摩天岭地区黑云母花岗岩中电气石的化学成分变化主要由以下替代机制控制: 1) $\text{FeMg}_{-1}(\text{Y} \text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Y} \text{Fe}^{2+})$; 2) $\text{X}, \text{Al}(\text{Na}, \text{R}^{2+})_{-1}(\text{Y} \text{Al}^{3+} + \text{X} \leftrightarrow \text{X} \text{R}^{2+} + \text{Y} \text{R}^{2+})$; 3) $\text{Na}, \text{Fe}^{2+}(\text{X}, \text{Al})_{-1}(\text{Y} \text{Al}^{3+} + \text{X} \leftrightarrow \text{X} \text{R}^{2+} + \text{Y} \text{Fe}^{2+})$, 这些替代机制共同导致了电气石成分的多样性。

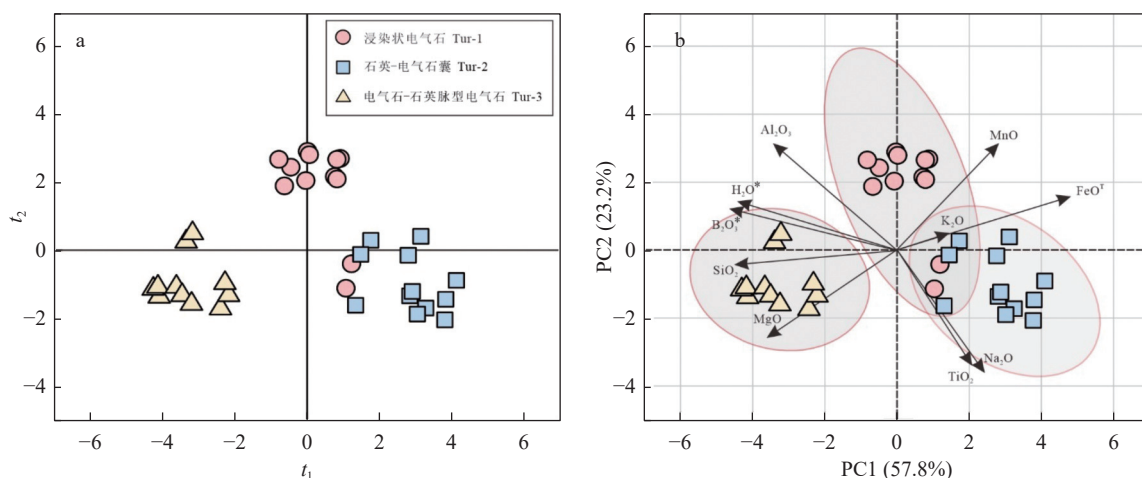


图 5 摩天岭地区花岗岩中电气石主量元素含量的主成分分析 (PCA)

Fig. 5 Principal component analysis (PCA) of Major elements concentration in tourmaline from the granite in Motianling area

a 和 b 分别为得分图和双标图

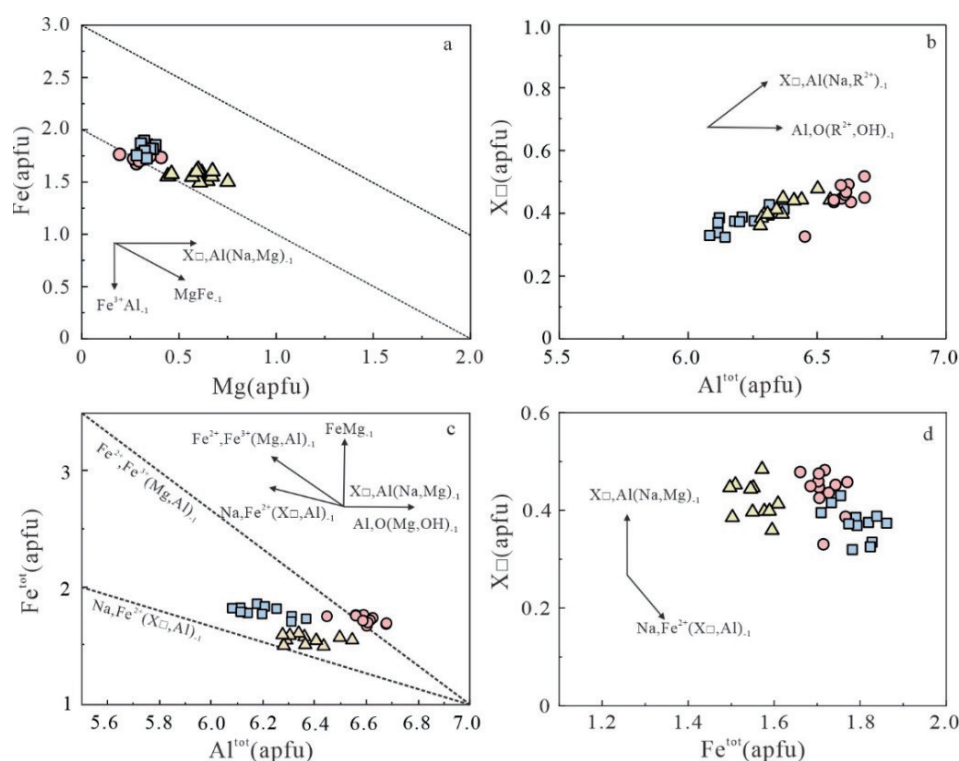


图6 电气石中阳离子占位及元素置换趋势图解

Fig. 6 Binary plot of cation occupancies and exchange vectors in tourmaline

a. Y 位置 Mg-Fe 置换图解; b. X 位置电气石中总 Al 与 X□图解; c. 总 Al 与总 Fe 图解; d. 总 Fe 与 X 位置 X□图解. 图例同图 3

4.2 电气石成分记录花岗岩岩浆-热液演化

电气石的分子结构能够体现与其处于平衡状态的流体及寄主岩石的化学组成(Pesquera et al., 2005; 于森, 2016)。通常, 岩浆热液成因的电气石化学组成受围岩性质影响显著, 其 Fe、Mg、Mn 等含量能反映母岩的化学特征: 当围岩为中性岩时, 电气石主要为富钠的镁电气石或铁电气石; 当围岩为基性火山岩时, 电气石多富含 Ca 和 Mg; 当围岩为花岗岩时, 电气石则多为富 Na 和 Fe 的黑电气石(Henry and Guidotti, 1985; 蒋少涌, 2000)。随着岩浆演化的持续进行, 电气石逐渐富集锂元素, 进而可能出现富锂电气石(van Hinsberg et al., 2011; 黄世强等, 2016)。

在摩天岭花岗岩中, 电气石以三种形式产出: 浸染状电气石(Tur-1)、石英-电气石囊(Tur-2)和电气石-石英脉型(Tur-3)(图 2)。已有研究指出, 岩浆成因的电气石通常具有均一的结构, 无成分分带现象, 且具有较高的 Fe/Mg 比值, 同时在 Y 位上富含 Al 阳离子; 而热液成因的电气石常表现出成分的振荡分带, 其特征为富含 Mg 且在

Y 位上无 Al 或低 Al(London and Manning, 1995; van Hinsberg et al., 2011; 陈希节, 2022)。岩相学观察显示, 摩天岭黑云母花岗岩中的浸染状电气石在光学显微镜和 BSE 电子图像下均无明显分带(图 3b、3c), 其化学成分相对均一, 具有较高的 Fe/Mg 比值(3.84 ~ 6.84)和较高的 Y 位 Al 阳离子数(部分高达 0.55)。在电气石主量元素分类图(图 4)中, Tur-1 主要集中在碱性黑电气石区域内, 这一特征也与大多数岩浆成因电气石相类似(Trumbull et al., 2013; 凤永刚等, 2022; 夏永旗等, 2024)。因此, 结合岩相学和地球化学特征, 可以判断 Tur-1 为岩浆成因, 直接结晶于摩天岭花岗岩分异演化晚期的残余熔体中。

关于花岗岩中石英-电气石囊的成因, 目前主要有 3 种认识: 1) 岩浆期后富硼流体的交代作用; 2) 岩浆演化晚期, 富硼花岗质熔体在局部的聚集作用; 3) 岩浆演化晚期, 不混溶富硼熔/流体的结晶作用(郭佳等, 2020; Harlaux et al., 2020)。显微镜下, Tur-2 多呈半自形-他形晶体, 交代早期长石、云母等矿物, 局部呈长石假晶, 反映了其形成

过程中强烈的流体活动。其成分上略高的 MgO 含量表明, 晚期出溶的流体交代了早期固结的花岗岩, 导致流体富 Mg 贫 Fe (Rozendaal and Bruwer, 1995)。基于以上特征, 本文认为第三种模式解释摩天岭黑云母花岗岩中石英-电气石囊的形成更为合适, 即在花岗质岩浆的演化晚期, 出现了不混溶的富硼熔/流体相。

Tur-3 以放射状集合体的形式出现, 这是热液成因电气石的典型结构特征 (郭佳等, 2020)。与 Tur-1 和 Tur-2 相比, Tur-3 在 Y 位点的 Al 含量较低, 这一特征与热液成因电气石的特性相符。随着结晶分异作用的持续进行, 电气石中的 Li 含量呈现出逐渐升高的趋势, 由于电气石中具有可变价态的金属元素, 如 Fe^{3+} 可以存在于 Y 和 Z 晶格位置上 (Henry et al., 2011; van Hinsberg et al., 2011), 使得利用 $[\text{Li}=15-(\text{T}+\text{Z}+\text{Y})\text{阳离子总}]$ 计算 Li 的 apfu 值具有较大不确定性。而利用 LA-ICP-MS 分析直接获取 Li 含量的方法更为可靠 (凤永刚等, 2022)。因此, 本文采用 LA-ICP-MS 原位微区分析获得电气石 Li 含量以探讨摩天岭地区电气石成因机制。Li 含量随着岩浆演化的进行逐渐升高的趋势与岩浆结晶分异过程中残余熔体对不相容元素富集的趋势相吻合 (郭佳等, 2020; 李乐广等, 2023)。在摩天岭地区, 电气石的化学成分也显示出类似趋势: Tur-2 比 Tur-1 更富 Li。在岩浆结晶分异过程中, 钒 (V) 倾向于进入电气石 ($D_{\text{V}}^{\text{Tur/melt}} = 3.09$, van Hinsberg, 2011)。基于这一特性, Drivenes et al. (2015) 提出, 可以通过电气石中 V 含量的变化来判断电气石形成的相对顺序。与 Tur-1 相比, 其余电气石 Sc、V 等微量元素含量较高 (图 5)。前人研究表明电气石中某些微量元素更可能受熔融/流体或局部流体-岩石相互作用的控制, 如 Sc、V 和 Co 含量从早期岩浆期电气石到后期热液电气石逐渐增加 (Hu D L et al., 2020)。Tur-2 不仅在结构上存在分带现象, 且其化学成分也存在明显变化, 这表明其形成过程中体系条件发生了转变, 石英-电气石囊直接从富硼的熔/流体中结晶, 局部交代早期的造岩矿物, 该过程代表了岩浆-热液转换阶段。从 Tur-1 到 Tur-3, 电气石的生长环境从岩浆阶段逐渐转变为热液

阶段, 这一转变过程可能被 Tur-2 记录下来。V、Co 等元素含量的进一步增加也暗示岩浆经历了持续的分异演化。因此, 摩天岭地区花岗岩中不同产状电气石的化学组成可能记录了花岗岩岩浆热液体系的演化过程。综上所述, 摩天岭黑云母花岗岩中电气石包括岩浆晚期的浸染状电气石 (Tur-1)、岩浆热液转换阶段的石英电气石囊 (Tur-2) 和热液阶段的电气石-石英脉 (Tur-3)。这三种不同产状的电气石记录了岩浆体系中流体活动的逐渐增强, 以及从岩浆阶段向热液阶段的演化过程。

4.3 对区内铀-锡成矿的启示

摩天岭地区产出两个与花岗岩相关的高品位铀矿床——新村和达亮铀矿床。对于富铀矿体的形成, 充足的铀源起着决定性作用。如前文所述, 摩天岭主体花岗岩中广泛发育富含挥发组分的岩浆电气石。挥发组分在岩浆结晶过程中扮演着关键角色, 它们通过降低岩浆的黏度和固相线温度, 延缓了岩浆的结晶时间, 同时提高了结晶程度。铀作为一种典型的不相容元素, 在富挥发组分的岩浆环境中, 其含量会随着挥发组分的作用而逐渐增加。挥发组分的存在不仅增强了岩浆对铀的富集能力, 还进一步提升了摩天岭主体花岗岩中铀的含量, 为岩体内晶质铀矿的形成提供了丰富的物质基础, 进而为达亮铀矿床和新村铀矿床内富矿体的形成提供更多的活性铀 (Zhang L et al., 2021; Yu Z et al., 2023)。

此外, 在摩天岭地区发育有九峰锡矿床, 该矿床位于摩天岭岩体西侧的四堡群内。锡石 U-Pb 同位素定年结果显示该矿床的成矿年龄为 $832 \pm 5.3 \text{ Ma}$ (Li S S et al., 2020), 与摩天岭花岗岩的形成年龄高度吻合, 表明九峰锡矿床的形成与摩天岭花岗岩的岩浆活动紧密相关。前人研究表明, 花岗质岩浆活动为锡成矿提供了热源和富 Sn-F-B 的流体 (Chen L et al., 2018; Xiang L et al., 2018)。具体而言, 在九峰锡矿床的形成过程中, 摩天岭花岗质岩浆在演化至晚期时形成的富含 F 和 B 的流体, 向西渗入四堡群, 为矿床的形成提供了充足的成矿物质来源 (Wang X L et al., 2006, 王孝磊等, 2017)。

5 结论

(1) 摩天岭地区花岗岩中发育三种不同类型的电气石: 岩浆晚期的浸染状电气石(Tur-1)、岩浆热液转换阶段的石英-电气石囊(Tur-2)、热液阶段的电气石-石英脉型(Tur-3), 并且这三种电气石绝大多数属于典型黑电气石系列, 其主要的替代机制为: 1) $\text{FeMg}_{-1}(\text{Y}\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Y}\text{Fe}^{2+})$; 2) $\text{X}\square, \text{Al}(\text{Na}, \text{R}^{2+})_{-1}(\text{Y}\text{Al}^{3+} + \text{X}\square \leftrightarrow \text{X}\text{R}^{2+} + \text{Y}\text{R}^{2+})$; 3) $\text{Na}, \text{Fe}^{2+}(\text{X}\square, \text{Al})_{-1}(\text{Y}\text{Al}^{3+} + \text{X}\square \leftrightarrow \text{X}\text{R}^{2+} + \text{Y}\text{Fe}^{2+})$ 。

(2) 从 Tur-1 到 Tur-3, 摩天岭黑云母花岗岩中不同类型的电气石反映了岩浆体系中流体活动的逐渐增强以及从岩浆阶段向热液阶段的转变。摩天岭主体花岗岩中广泛发育富含挥发组分的岩浆电气石, 挥发组分在岩浆结晶过程中扮演着关键角色, 它们能够降低岩浆的黏度和固相线温度, 延缓了岩浆的结晶时间, 同时提高了结晶程度, 挥发组分的存在不仅增强了岩浆对铀的富集能力, 还进一步提升了摩天岭主体花岗岩中铀的含量, 为岩体内晶质铀矿的形成提供了丰富的物质基础。随着摩天岭花岗质岩浆演化至晚期, 会形成富含 F 和 B 的流体, 这为锡成矿提供了热源以及富 Sn-F-B 的流体, 为矿床的形成供应了充足的成矿物质, 由此可见富含挥发组分的摩天岭花岗质岩体及相关的流体, 为区内铀矿和锡矿的形成奠定了物质基础。

参考文献:

- 陈峰, 颜丹平, 邱亮, 杨文心, 汤双立, 郭庆银, 张翼西. 2019. 江南造山带西南段摩天岭穹隆脆韧性剪切与铀成矿作用 [J]. 岩石学报, 35(9): 2637-2659.
- 陈希节, 负晓瑞, 雷敏, 张盛生, 蔡志慧, 刘若涵, 李振宇, 何碧竹. 2022. 青海共和盆地三叠纪中酸性侵入岩中电气石化学组成、硼同位素特征及对岩浆-热液演化的启示 [J]. 岩石学报, 38(11): 3359-3374.
- 凤永刚, 梁婷, 王梦玺, 张泽, 郝媛媛, 岑炬标, 董紫艳. 2022. 东秦岭花岗岩伟晶岩中电气石地球化学特征及成矿指示意义 [J]. 岩石学报, 38(2): 428-451.
- 郭佳, 严海波, 凌明星, 章荣清. 2020. 广西大厂地区黑云母花岗岩中电气石的化学组成及其对岩浆热液演化的指示 [J]. 岩石学报, 36(1): 171-183.
- 郭伟康, 董随亮, 张松浩, 李光明, 付建刚, 张林奎, 张志. 2025. 西藏嘎波伟晶岩型锂矿中电气石组成、硼同位素特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 41(3): 804-819.
- 黄世强, 宋玉财, 程杨, 薛传东, 韩朝辉, 庄亮亮. 2016. 滇西茅草坪脉状铜矿床电气石的发育特征、成分及其意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 35(1): 124-138.
- 蒋少涌, 于际民, 倪培, 凌洪飞. 2000. 电气石——成岩成矿作用的灵敏示踪剂 [J]. 地质论评, 46(6): 594-604.
- 李乐广, 王连训, 朱煜翔, 马昌前, 余振兵, 曹亮, 冷双梁, 闫育养. 2023. 华南幕阜山北缘含稀有金属伟晶岩成矿时代及成矿过程 [J]. 地球科学, 48(9): 3221-3244.
- 李献华, 李寄岬, 刘颖, 陈多福, 王一先, 赵振华. 1999. 华夏古陆古元古代变质火山岩的地球化学特征及其构造意义 [J]. 岩石学报, 15(3): 364-370.
- 李真真, 秦克章, 裴斌, 赵俊兴, 施睿哲, 赵泽龙, 韩日. 2020. 大兴安岭南段白音查干 Sn-Ag-Zn-Pb 矿床电气石矿物学特征及对岩浆-热液演化过程的启示 [J]. 岩石学报, 36(12): 3797-3812.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} [J]. 长春地质学院学报, (2): 155-162.
- 秦亚, 冯佐海, 黄靖哲, 白玉明, 吴杰, 张桂林, 万磊. 2021. 桂北地区三门韧性剪切带的厘定及其构造意义 [J]. 地球科学, 46(11): 4017-4032.
- 宋昊, 徐争启, 倪师军, 张成江, 梁军, 程发贵, 唐纯勇. 2015. 广西摩天岭岩体对江南造山带西南段构造演化的响应: 来自新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学证据 [J]. 大地构造与成矿学, 39(6): 1156-1175.
- 唐攀, 唐菊兴, 林彬, 李发桥, 孙渺, 祁婧, 崔洁, 王梦蝶, 熊妍, 傅渊慧, 张忠坤, 杨征坤, 姚晓峰, 谢金玲, 陶刚, 杨欢欢. 2024. 西藏甲玛铜多金属矿电气石矿物学特征及其对热液流体演化的指示 [J]. 中国地质, 51(4): 1123-1138.
- 王孝磊, 周金城, 陈听, 张凤凤, 孙梓铭. 2017. 江南造山带的形成与演化 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 714-735+696.
- 王臻, 陈振宇, 李建康, 陈毓川. 2022. 川西甲基卡 308 号脉的矿物学特征及其岩浆-热液演化示踪 [J]. 地质学报, 96(6): 2039-2061.
- 夏永旗, 庾明洁, 李诺, 祁冬梅, 加纳提古丽·吾斯曼, 王慧慧, 王文波, 李婷, 邵宗尧. 2024. 云母和电气石矿物化学

- 特征对西昆仑大红柳滩地区伟晶岩型锂矿化的指示[J]. 地球科学, 49(3): 922-938.
- 徐争启, 宋昊, 尹明辉, 张成江, 陈发贵, 唐纯勇. 2019. 华南地区新元古代花岗岩铀成矿机制——以摩天岭花岗岩为例[J]. 岩石学报, 35(9): 2695-2710.
- 叶凡琛, 王凯兴. 2024. 热液蚀变与元素迁移: 以广西摩天岭北部高芒铀矿化为例[J]. 华南地质, 40(4): 655-670.
- 于森, 丰成友, 刘洪川, 李定武, 王辉, 刘建楠, 赵一鸣, 李大新. 2016. 青海杂林格砂卡岩铁多金属矿床 Fe-Ti 氧化物及其热动力学意义[J]. 地球学报, 37(2): 204-214.
- 邹明亮, 舒孝敬, 范立亭, 梁永东. 2011. 桂北摩天岭含铀花岗岩体岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(4): 415-422.
- Buriánek D, Novák M. 2007. Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites: Examples from the Bohemian Massif, Czech Republic[J]. Lithos, 95(1-2): 148-164.
- Chen L, Wang Z Q, Yan Z, Gong J H, Ma S X. 2018. Zircon and cassiterite U-Pb ages, petrogeochemistry and metallogenesis of Sn deposits in the Sibao area, northern Guangxi: constraints on the Neoproterozoic granitic magmatism and related Sn mineralization in the western Jiangnan Orogen, South China[J]. Mineralogy and Petrology, 112: 437-463.
- Codeço M S, Weis P, Trumbull R B, Hinsberg V V, Pinto F, Lecumberri-Sanchez P, Schleicher A M. 2021. The imprint of hydrothermal fluids on trace-element contents in white mica and tourmaline from the Panasqueira W-Sn-Cu deposit, Portugal[J]. Mineralium Deposita, 56: 481-508.
- Drivenes K, Larsen R B, Müller A, Sørensen B E, Wiedenbeck M, Raanes M P. 2015. Late-magmatic immiscibility during batholith formation: Assessment of B isotopes and trace elements in tourmaline from the land's End granite, SW England[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 169(9): 56.
- Geladi P, Isaksson H, Lindqvist L, Wold S, Esbensen K. 1989. Principal component analysis of multivariate images[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 5(3): 209-220.
- Grahn H, Geladi P. 1996. Application of multivariate data analysis techniques to NMR imaging[M]//Data Handling in Science and Technology. Elsevier, 18: 513-534.
- Greenacre M, Groenen P J F, Hastie T, D'Enza A I, Markos A, Tuzhilina E. 2022. Principal component analysis[J]. Nature Reviews Methods Primers, 2(1): 100.
- Harlaux M, Kouzmanov K, Gialli S, Laurent S, Rielli A, Dini A, Chauvet A, Menzies A, Kalinaj M, Fontboté L. 2020. Tourmaline as a tracer of late-magmatic to hydrothermal fluid evolution: The world-class San Rafael tin (-copper) deposit, Peru[J]. Economic Geology, 115(8): 1665-1697.
- Henry D J, Dutrow B L, Grew E S, Anovite L M. 1996. Metamorphic tourmaline and its petrologic applications[J]. Reviews in Mineralogy, 33: 503-558.
- Henry D J, Dutrow B L. 2012. Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic conditions: Its petrologic applicability[J]. Lithos, 154: 16-32.
- Henry D J, Guidotti C V. 1985. Tourmaline in the central Swedish ore district[J]. Mineralium Deposita, 29: 189-205.
- Henry D J, Novák M, Hawthorne F C, Ertl A, Dutrow B L, Uher P, Pezzotta F. 2011. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals[J]. American Mineralogist, 96(5-6): 895-913.
- Hu D L, Jiang S Y. 2020. In-situ elemental and boron isotopic variations of tourmaline from the Maogongdong deposit in the Dahutang W-Cu ore field of northern Jiangxi Province, South China: Insights into magmatic-hydrothermal evolution[J]. Ore Geology Reviews, 122: 103502.
- Li L G, Wang L X, Romer R L, Ma C Q, Cao L, Tian Y. 2025. Using tourmaline to trace Li mineralization in the Mufushan granitic batholith, South China[J]. Chemical Geology, 671: 122485.
- Li S S, Feng Z H, Qin Y, Pang, C J, Dai Y, Li S H, Cao J, Bai Y M, Wang C Z. 2020. The relationship between ductile shear zone and mineralization in the Jiufeng Sn deposit, northern Guangxi, South China: Evidence from structural analysis and cassiterite U-Pb dating[J]. Ore Geology Reviews, 124: 103655.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Cao G G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257(1-2): 34-

- 43.
- London D, Manning D A C. 1995. Chemical variation and significance of tourmaline from southwest England[J]. *Economic Geology*, 90(3): 495-519.
- Pesquera A, Torres-Ruiz J, Gil-Crespo P P, Gil-Crespo, Jiang S Y. 2005. Petrographic, chemical and B-isotopic insights into the origin of tourmaline-rich rocks and boron recycling in the Martinamor Antiform (Central Iberian Zone, Salamanca, Spain)[J]. *Journal of Petrology*, 46(5): 1013-1044.
- Qiu L, Yan D P, Ren M H, Cao W T, Tang S L, Guo Q Y, Fan L T, Qiu J T, Zhang Y X, Wang Y W. 2018. The source of uranium within hydrothermal uranium deposits of the Motianling mining district, Guangxi, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 201-217.
- Rozendaal A, Bruwer L. 1995. Tourmaline nodules: indicators of hydrothermal alteration and SnZn(W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 21(1): 141-155.
- Tindle A G, Breaks F W, Selway J B. 2002. Tourmaline in petalite-subtype granitic pegmatites: evidence of fractionation and contamination from the Pakeagama Lake and Separation Lake areas of northwestern Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 40(3): 753-788.
- Trumbull R B, Beurlen H, Wiedenbeck M, Soares. 2013. The diversity of B-isotope variations in tourmaline from rare-element pegmatites in the Borborema Province of Brazil[J]. *Chemical Geology*, 352: 47-62.
- van Hinsberg V J, Henry D J, Marschall H R. 2011. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment[J]. *The Canadian Mineralogist*, 49(1): 1-16.
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M, Zhang G L. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 145: 111-130.
- Wu H H, Huang H, Zhang Z C, Yang S H, Gao Y B, Finch A A. 2024. Tourmaline chemical and boron isotopic constraints on the magmatic-hydrothermal transition and rare-metal mineralization in alkali granitic systems[J]. *American Mineralogist*, 109(8): 1461-1477.
- Xiang L, Wang R C, Erdmann S, Sizaret S, Lu J J, Zhang W L, Xie L, Che X D, Zhang R Q. 2018. Neoproterozoic mineralization in a hydrothermal cassiterite-sulfide deposit at Jiumao, northern Guangxi, South China: mineral-scale constraints on metal origins and ore-forming processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 94: 172-192.
- Yu Z, Liu L, Ling H, Chen P, Chen W, Hu T Y, Huang D. 2023. Apatite as a probe into the nature and origin of hydrothermal fluids responsible for U leaching in the Lujing granite-related U Deposits, South China[J]. *Economic Geology*, 118(5): 1177-1199.
- Zhang L, Chen Z Y, Wang F Y, White N C, Zhou T F. 2021. Release of uranium from uraninite in granites through alteration: Implications for the source of granite-related uranium ores[J]. *Economic Geology*, 116(5): 1115-1139.
- Zhao H D, Zhao K D, Palmer M R, Jiang S Y. 2019. In-situ elemental and boron isotopic variations of tourmaline from the Sanfang granite, South China: Insights into magmatic-hydrothermal evolution[J]. *Chemical Geology*, 504: 190-204.
- Zhu K H, Wang K X, Gao S, Tan S, Liu X D, Bonnetti C, Wu K M, Yu C D, Sun L Q, Yang H. 2024. Unraveling the genetic type and metallogenetic mechanism of the oldest uranium deposit associated with granitoid, South China: A comprehensive analysis of whole-rock geochemistry, and elemental and U-Pb isotopic signatures of uranium minerals[J]. *Ore Geology Reviews*, 175: 106376.