



引文格式: 景海玺, 王梦玺, 凤永刚, 等. 东秦岭早古生代漂池花岗岩体中电气石成因及其微量元素特征对稀有金属成矿的指示[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 254–269. DOI: 10.12401/j.nwg.2025147

Citation: JING Haixi, WANG Mengxi, FENG Yonggang, et al. Genesis of Tourmaline in the Early Paleozoic Piaoichi Granitic Pluton in East Qinling: Implications for the Rare Metal Mineralization[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 254–269. DOI: 10.12401/j.nwg.2025147

## 东秦岭早古生代漂池花岗岩体中电气石成因及其微量元素特征对稀有金属成矿的指示

景海玺<sup>1</sup>, 王梦玺<sup>1,2,\*</sup>, 凤永刚<sup>1,2</sup>, 孙小筠<sup>1</sup>, 梁婷<sup>1</sup>, 周义<sup>1</sup>

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 花岗质熔体岩浆–热液期演化是形成花岗伟晶岩及相关稀有金属矿床的重要阶段, 但其主要控制因素尚不清楚。东秦岭构造带发育有大量早古生代花岗岩和赋存稀有金属矿化的花岗伟晶岩, 二者之间的成因联系一直备受关注。为查明花岗岩体冷凝晚期岩浆–热液系统的性质和演化过程, 为东秦岭稀有金属成矿机制提供矿物学约束, 笔者对该地区最大的 S 型花岗岩漂池岩体岩浆–热液阶段形成的电气石进行了系统分类和精细原位成分研究。岩体中电气石可分为浸染状电气石(Tur-D)、石英–电气石结核(Tur-N)、电气石–石英脉(Tur-V)和沿片麻理分布的电气石(Tur-d)4 类。漂池岩体中 Tur-N 和 Tur-V 电气石主量元素之间主要为 (Na, Mg) (X<sub>vac</sub>, Al)<sub>-1</sub> 和 (Mg, OH) (Al, O)<sub>-1</sub> 两种替换机制, 缺少 Fe<sup>3+</sup>Al<sub>1</sub> 替换机制, 指示岩体晚期流体较还原; Na 在 X 位占位率逐渐升高, 指示流体具有中高盐度。根据形态和成分, Tur-D 电气石可进一步分为 Tur-D1 和 Tur-D2。Tur-D1 为黑电气石, Y 位上存在大量 Al, 结晶于岩浆冷凝的相对早期阶段; Tur-D2 为镁电气石, 包裹并局部交代 Tur-D1 电气石, 可能是后期外部流体作用的产物。Tur-N 电气石可进一步分为 Tur-N1 和 Tur-N2。Tur-N1 为黑电气石, 以高 Fe、Sn、Nb、Ta、Zn 和低 Mg、V、Sr 含量为特征, 形成于岩浆结晶晚期分离出的不混溶含水富 B 热液; Tur-N2 和 Tur-V 电气石具有相似的化学成分, 显示由黑电气石向镁电气石过渡的趋势, 二者 Mg、V、Sr、Pd 含量明显高于 Tur-N1 电气石, 可能暗示了来自围岩流体对岩浆热液成分的影响。Tur-d 为镁电气石, 且与黑云母关系密切, 在边部及裂隙处发育有磁铁矿, 指示富 B 流体对岩体中已结晶黑云母的交代。此外, 漂池岩体 Tur-N1 电气石中较高的 Nb 和 Ta 含量表明岩浆–热液体系演化中曾存在过短暂的 Nb、Ta 富集过程, 但较还原的环境以及与围岩较强烈的相互作用可能最终制约了 Nb-Ta 矿化。因此, 花岗质熔体在岩浆–热液阶段通过熔体分异、不混溶流体出溶等过程的确能够促进稀有金属富集, 但是否具有成矿潜力主要受控于流体氧化还原条件及与围岩相互作用。

**关键词:** 电气石; 岩浆–热液阶段; 漂池岩体; 东秦岭

中图分类号: P581; P571

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0254-16

收稿日期: 2025-10-13; 修回日期: 2025-12-15; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0605202), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2025JC-YBMS-292)联合资助。

作者简介: 景海玺(2000–), 男, 硕士研究生, 矿物学, 岩石学, 矿床学专业。E-mail: 2898638011@qq.com。

\* 通讯作者: 王梦玺(1986–), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为岩浆作用与成矿研究。E-mail: mxwang@chd.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

## Genesis of Tourmaline in the Early Paleozoic Piaochi Granitic Pluton in East Qinling: Implications for the Rare Metal Mineralization

JING Haixi<sup>1</sup>, WANG Mengxi<sup>1,2,\*</sup>, FENG Yonggang<sup>1,2</sup>, SUN Xiaoyun<sup>1</sup>, LIANG Ting<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The magmatic-hydrothermal evolution during the differentiation of granitic magma is a key stage to the formation of magmatic pegmatites and related rare-metal mineralization. However, the controlling factors during this process are still unclear. Numerous Paleozoic felsic plutons and rare-metal-mineralized granitic pegmatites occur in the East Qinling tectonic belt, and their genetic relationship has attracted much attention. In order to examine the magmatic-hydrothermal evolution at the late stage of the felsic plutons and shed light on the formation of rare-metal mineralization in East Qinling, we carried out comprehensive analyses on *in situ* major and trace elements for tourmaline from the Piaochi pluton, the largest S-type granite in East Qinling. Tourmaline from the Piaochi pluton can be divided into four types, *i.e.*, disseminated tourmaline (Tur-D), quartz-tourmaline nodules (Tur-N), tourmaline-quartz veins (Tur-V), and tourmaline along schistosity (Tur-d). The substitution of major elements of Tur-N and Tur-V tourmalines is mainly controlled by (Na, Mg) ( $X_{\text{vac}}$ , Al)<sub>-1</sub> and (Mg, OH) (Al, O)<sub>-1</sub>, instead of Fe<sup>3+</sup>Al<sub>-1</sub> substitution. This indicates that the hydrothermal fluids of the Piaochi pluton are in a reducing environment with medium-high salinity content. Based on the occurrence and composition of Tur-D tourmaline, it can be further divided into Tur-D1 and Tur-D2. Tur-D1 is schorlite with a considerable amount of Al in the Y-site, indicating that they crystallize at an early stage of magma cooling. In contrast, Tur-D2 is dravite and replaces Tur-D1 in local places with Tur-D1 tourmaline inclusions, possibly due to the interaction with external fluids at a late stage. Tur-N tourmaline can be further divided into Tur-N1 and Tur-N2. Tur-N1 is schorlite with high Fe, Sn, Nb, Ta, and Zn and low Mg, V, and Sr, and crystallizes from immiscible aqueous boron-rich fluids at the late stage of magma differentiation. Tur-N2 and Tur-V tourmaline have similar compositions, varying from schorlite to dravite, with higher Mg, V, Sr, and Pd compared to Tur-N1. This suggests the influence of the external fluids from country rocks on the composition of magmatic-hydrothermal evolution of the Piaochi pluton. Tur-d tourmaline (dravite) is closely related to biotite, with magnetite occurring along its rims and fractures, indicating that the metasomatism of biotite by boron-rich fluids. Additionally, the high Nb and Ta concentrations of Tur-N1 tourmaline suggest a transient Nb-Ta enrichment on cooling of the Piaochi pluton. Nevertheless, the reduced condition and intensive interaction with country rocks may impede the Nb-Ta mineralization at a late stage of cooling. Therefore, rare metals would be enriched by the felsic melt differentiation and the exsolution of immiscible fluid during the magmatic-hydrothermal stage. However, the potential of rare-metal mineralization is mainly controlled by the redox condition of the fluids and the interaction with wall-rocks.

**Keywords:** tourmaline; magmatic-hydrothermal evolution; Piaochi pluton; east Qinling

电气石是花岗岩、花岗伟晶岩及其相关岩浆-热液矿床(如钨锡矿、斑岩 Cu-Mo 矿床和伟晶岩型稀有金属矿床)中主要硼硅酸盐矿物(London et al., 1996; Harlaux et al., 2020), 具有较大温压稳定范围和较强抗蚀变能力(Yang et al., 2015), 而且晶体中元素扩散速率可忽略不计(Henry et al., 2011)。因此, 电气石可以很好地记录其结晶和生长过程中共存流体和/或熔体的物理化学性质及其变化过程, 为研究花岗岩和花岗

伟晶岩熔体和/或流体的演化及岩石成因提供重要信息(van Hinsberg et al., 2011a; Yang et al., 2015)。

东秦岭构造带(即北秦岭造山带东段)中发育有大量早古生代花岗岩和具有 Li、Be、Nb、Ta 等稀有金属矿床的花岗伟晶岩(陈西京等, 1993; 王汉辉等, 2023), 二者在空间上共生, 其成因联系一直备受关注(Zhou et al., 2021)。目前研究认为, 花岗伟晶岩主要形成于花岗质岩浆的结晶分异或变质地层的深熔作

用中(周起凤等, 2023)。东秦岭地区最大的S型花岗岩漂池岩体形成时代为473~495 Ma(Qin et al., 2014), 比区域上花岗伟晶岩形成的主体时代(363~447 Ma)早至少26 Ma(Zhou et al., 2021), 因此有学者认为二者可能不具有成因关系(王梦玺等, 2022)。然而, 东秦岭早古生代花岗岩体中仅漂池岩体具有和赋存稀有金属矿床(化)花岗伟晶岩相同的源区, 均被认为是秦岭群深熔作用的产物(Zhou et al., 2021)。因此, 查明漂池岩体在岩浆-热液阶段的演化过程有助于进一步认识东秦岭稀有金属矿床形成过程, 为找矿勘查提供启示。

前人对漂池岩体的研究多集中于源区性质和岩浆演化过程, 而对岩浆-热液阶段的演化缺乏详细研究, 制约了人们对岩体成因及稀有金属富集过程的认识。漂池岩体中发育有大量具有环带结构的电气石, 为研究岩体岩浆-热液阶段演化及稀有金属富集机制提供了良好的对象。笔者通过对岩体中电气石进行原位成分分析, 揭示花岗质岩浆冷凝晚期岩浆-热液阶段的演化过程, 进而探讨东秦岭地区早古生代壳源岩浆活动与稀有金属成矿之间的关系。

## 1 地质背景

秦岭造山带以商丹缝合带为界被分为北秦岭构造带和南秦岭构造带(Dong et al., 2011; 葛战林等, 2020; 高永宝等, 2026; 图1a)。北秦岭构造带从北到南依次出露宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群和松树沟元古宙蛇绿岩4个单元(Dong et al., 2011)。其中, 宽坪岩群形成于新元古代—早古生代, 主要由强烈变形的绿片岩、斜长角闪岩、大理岩和云母石英片岩组成(Wu et al., 2013)。二郎坪岩群形成于早古生代, 主要由基性-中性火山岩、浅成岩脉、细粒碎屑岩和燧石组成, 含寒武系-奥陶系化石, 经历了绿片岩相到角闪岩相变质作用(Dong et al., 2011)。秦岭岩群形成于新元古代早期, 是北秦岭构造带最古老的结晶基底, 主要由含石榴石黑云母斜长片麻岩、石榴石砂线石片麻岩、角闪岩和大理岩组成(Dong et al., 2011)。松树沟蛇绿岩主要由角闪岩相变质基性岩和超基性岩组成(Dong et al., 2008)。

秦岭造山带中早古生代花岗岩大部分出露于北秦岭构造带, 并且在东秦岭地区最为发育, 包括灰池子和漂池等代表性岩体(图1b)。这些岩体多以岩基

或不规则小岩体产出, 主要岩石类型有英云闪长岩、黑云母二长花岗岩等(陈西京等, 1993)。前人对东秦岭早古生代花岗岩锆石U-Pb年龄的统计表明, 该时期花岗质岩浆活动可以分为3期: 第一期(485~500 Ma)形成了区域上最大的S型花岗岩漂池岩体; 第二期(~450 Ma)以广泛发育的二长花岗岩为特征, 形成了区域上最大I型花岗岩灰池子岩体的主体; 第三期(~420 Ma)形成区域上分布范围和规模均较小的正长花岗岩(王梦玺等, 2022)。

## 2 漂池岩体地质特征

漂池岩体沿朱夏断裂带呈不规则拉长状, 长轴方向与区域构造线方向一致, 呈岩基状产出, 出露面积约为145 km<sup>2</sup>(图1b)。岩体受到强烈的剪切作用, 与围岩秦岭群黑云斜长片麻岩呈明显的侵入接触关系(Qin et al., 2014)。前人研究认为, 漂池岩体具有弱过铝质和富钠的特征, 是杂砂质岩石在地壳深部低温条件下含水部分熔融的产物(Qin et al., 2014)。黑云母二长花岗岩和二长花岗岩构成岩体的主体, 白云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩仅在岩体边缘局部出露(图2a、图2b), 各岩性之间为渐变接触关系, 无明显界线(图2a、图2b)。岩体中4种主要岩石类型中均发育有电气石, 多分布于主体岩石黑云母二长花岗岩和二长花岗岩中, 而边部二云母二长花岗岩和白云母二长花岗岩中电气石含量较低。考虑到不同类型花岗岩中电气石可能是岩浆期至热液期的产物, 笔者从漂池岩体4种岩石类型中均采集了样品。

## 3 电气石样品特征

根据野外产状特征, 可将含电气石样品分为: 浸染状电气石(Tur-D; 图2c)、石英-电气石结核(Tur-N; 图2d)、电气石-石英脉(Tur-V; 图2e)、沿片麻理定向分布的电气石(Tur-d; 图2f)4种类型。

### 3.1 浸染状电气石(Tur-D)

浸染状电气石发育于黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩和二长花岗岩中, 呈半自形-自形粒状、柱状, 粒径为0.1~1 mm, 分布在石英、长石等造岩矿物之间(图2c), 个别颗粒包裹石英、长石等矿物(图3a、图3b)。根据成分差异可将其进一步分为Tur-D1和Tur-D2电气石, 部分Tur-D2电气石包裹或局部交代

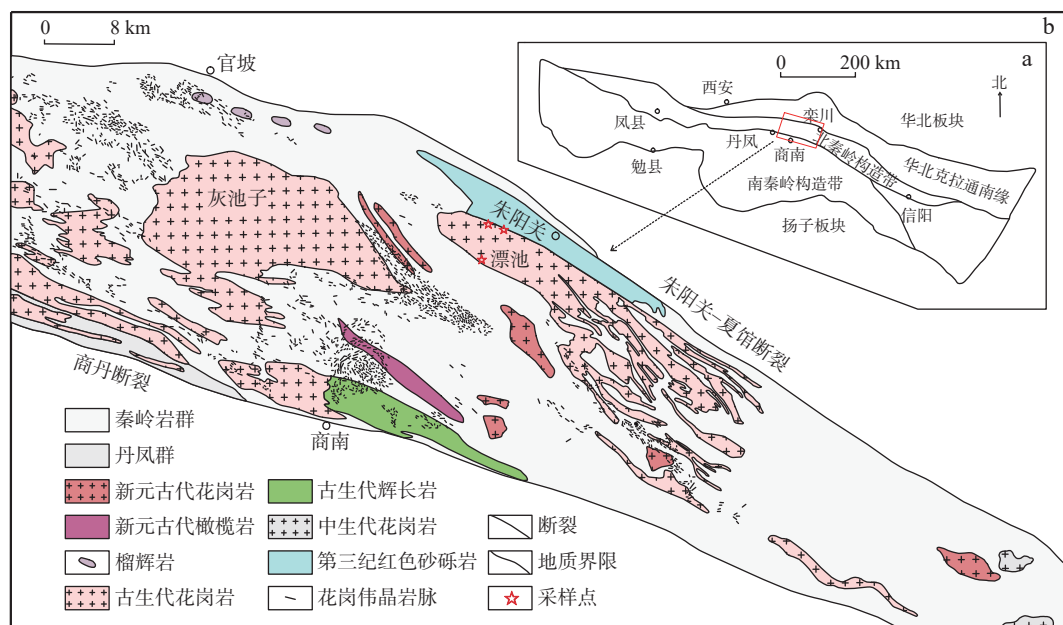


图1 东秦岭构造带早古生代花岗岩和花岗伟晶岩分布图(据陈西京等, 1993; 栾川幅 1:20 万区域地质图修改)

Fig. 1 Distribution of the Early Paleozoic granitic plutons and pegmatites in the East Qinling tectonic belt, Central China

Tur-D1 电气石形成核-边结构(图 3a)。

### 3.2 石英-电气石结核中电气石(Tur-N)

石英-电气石结核主要分布于黑云母二长花岗岩和二长花岗岩中,呈直径 1~10 cm 的椭圆形(图 2d),主要由电气石(45%~60%)、石英(30%~40%)、斜长石(5%~15%)和钾长石(5%~10%)组成,局部可见斜长石包裹于电气石中(图 3d)。Tur-N 电气石形态多样,粒径变化较大(0.1 mm~1.5 cm),根据成分差异可将其分为粒状 Tur-N1 和粒状、柱状、放射状 Tur-N2 电气石(图 3c~图 3f),其中含 Tur-N2 的石英-电气石结核在岩体中更为常见。在 Tur-N2 电气石中可见核-边结构(图 3f),在单偏光镜下其核部为淡黄色,边部为黄-黄褐色,部分电气石出现核部黄色、边部浅青灰色的特征(图 3e)。此外,石英-电气石结核外被一层宽约 0.5~2 cm、由石英、斜长石和钾长石组成的浅色晕所包裹(图 2d),并且在极少数 Tur-N2 电气石结核外可见电气石细脉与之相连(图 2d)。

### 3.3 电气石-石英脉中电气石(Tur-V)

电气石-石英脉发育于黑云母二长花岗岩、白云母二长花岗岩、二长花岗岩及围岩接触带,脉宽为 0.5~5 cm 不等,延伸 1~20 m 不等,大多数脉体相互平行展布。电气石-石英脉主要矿物为电气石(60%~80%)、石英(20%~30%)和少量长石(5%~10%),其中电气石主要分布在脉体中部而石英则分布在边部(图 2e),构成明显的“电气石核部-石英边部”

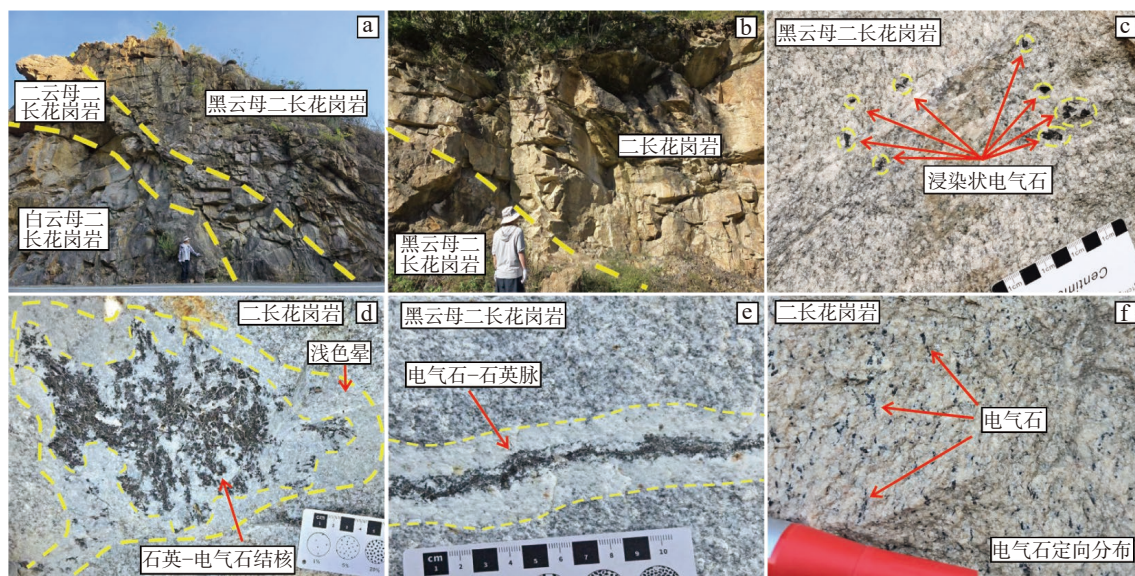
的分带特征。电气石呈半自形-自形粒状、柱状和放射状,粒径为 0.1~4 mm,发育有振荡环带和简单环带(图 3g)。镜下显示 Tur-V 电气石振荡环带核部较为复杂,在局部包裹有细小石英颗粒,其颜色较浅且变化无明显规律,而环带边部缺少包裹矿物且颜色呈明-暗振荡变化(图 3g)。

### 3.4 沿片麻理定向分布的电气石(Tur-d)

沿片麻理定向分布的电气石发育于弱片麻理化黑云母二长花岗岩中,以及二长花岗岩与围岩交界处,主要沿片麻理近直立状定向展布,与黑云母关系密切(图 3h),形成与围岩近平行、宽 2~3 m 的电气石化带(电气石含量为 5%~10%)(图 2f)。电气石呈半自形-自形粒状或柱状,粒径为 0.3~0.7 mm,振荡环带发育(图 3h),局部可见不透明磁铁矿分布于电气石边部或裂隙中(图 3l)。

## 4 分析方法

电气石原位主量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所深地过程与战略矿产资源国家重点实验室完成,所用仪器为日本电子 JXA-8230 型电子探针(EPMA)。工作条件为:加速电压 15 kV,加速电流 20 nA,束斑 10 μm,分析 Si、Al、Ti、V、Fe、Ca、Na、Mg、Mn、K 及 F 等 11 种元素。K、Si、Fe、Mg、Ca 和 Al 的特征峰及背景信号收集时间分别为 20 s 和 10 s, Ti 和 Mn



a. 黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩和白云母二长花岗岩在野外露头呈渐变接触；b. 黑云母二长花岗岩与二长花岗岩为漂池岩体主体，二者之间呈渐变接触；c. 黑云母二长花岗岩中电气石浸染状分布在石英、长石等造岩矿物之间；d. 二长花岗岩中椭圆形石英-电气石结核，可见电气石细脉与之相连；e. 黑云母二长花岗岩中电气石-石英脉；f. 弱片麻理化二长花岗岩电气石化带中沿片麻理定向排列的电气石

图2 漂池岩体野外露头及不同类型电气石照片

Fig. 2 Field outcrops of the Piaoichi pluton and photos of different types of tourmaline

的特征峰及背景信号收集时间分别为 40 s 和 20 s, Na、F 和 Cl 的特征峰及背景信号收集时间分别为 10s 和 5 s。对于氧化物含量大于 1% 的元素, 测试精度(相对偏差 RSD)优于 3%, 氧化物含量为 0.1%~1% 的元素, 测试精度(相对偏差 RSD)优于 10%。

原位微量元素分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。所用仪器为 Agilent 7700 ICP-MS 及美国 Photon Machines 公司 193 nm 气态准分子激光剥蚀系统。测试过程中, 激光束斑直径为 35  $\mu\text{m}$ , 样品表面的激光能量密度为  $\sim 5.93 \text{ J/cm}^2$ , 激光脉冲频率为 5 Hz。采用 NIST 610 玻璃标样作为外标, NIST 612 和 BC28 作为质量监控, 利用中国地质调查局 BIR-1G、BHVO-2G 等多个玄武质玻璃标样。微量元素详细分析方法见栾燕等(2021)。利用软件 ICPDatacal10.1(Liu et al., 2008)对分析数据进行离线处理。对于大多数微量元素, 测试精度优于 10%。

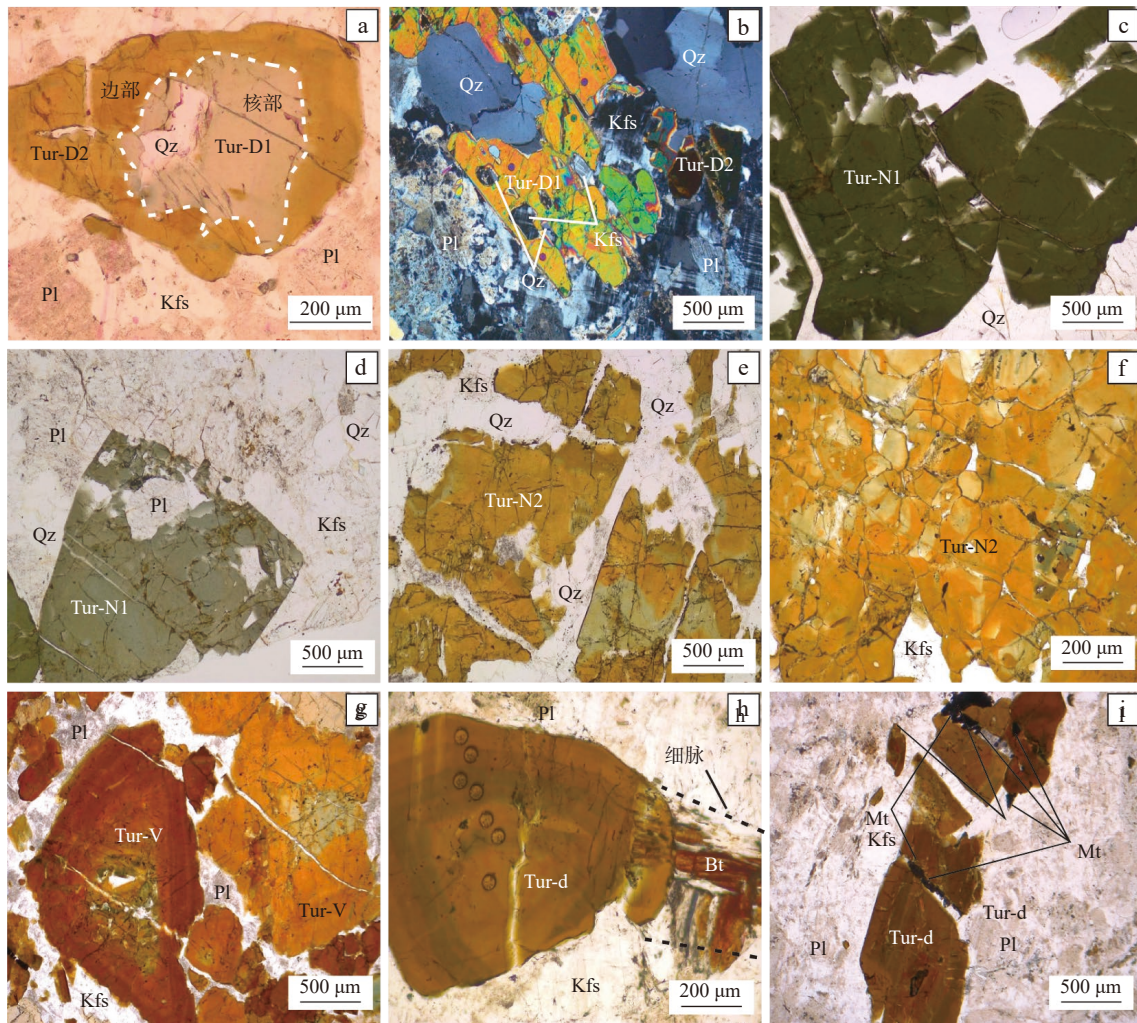
## 5 分析结果

### 5.1 主量元素

电气石中  $\text{TiO}_2$  (0.19%~2.71%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (26.85%~

34.00%)、 $\text{FeO}^T$  (2.35%~14.77%)、 $\text{MgO}$  (1.66%~7.21%) 含量变化较大, 而  $\text{SiO}_2$  (34.61%~37.22%)、 $\text{MnO}$  (<0.25%)、 $\text{CaO}$  (0.10%~1.17%)、 $\text{Na}_2\text{O}$  (1.61%~2.48%) 含量变化较小,  $\text{K}_2\text{O}$  含量较低(<0.19%) (表 1)。基于 X 位阳离子占位率的分类, 漂池岩体中电气石属于碱基组电气石, 分布在黑电气石端元和镁电气石端元之间(图 4a)。在 Ca-Fe-Mg 三元图解中, Tur-N1 电气石分布于与贫 Li 花岗岩及相关伟晶岩、细晶岩相关的区域, Tur-d 及 Tur-D2 电气石分布于与贫 Ca 变质泥岩、变质砂岩和石英-电气石岩相关的区域, 其它电气石则为二者之间的过渡类型(图 4b)。

Tur-D1 电气石 Al 和 Tur-N1 电气石 Fe 明显高于其它类型电气石(分别为 6.14~6.70 apfu、1.78~2.02 apfu; 图 4c、图 4d)。Tur-D2 电气石中 Ti 变化较大(0.06~0.33 apfu), Tur-d 电气石中 Mg 和 Ca 含量相对较高(图 4e)。Tur-N2、Tur-V 及 Tur-d 电气石环带结构发育。Tur-N2 电气石从核部到边部 Mg、Na、Ca、Ti 含量升高, Al 含量下降(图 5a、图 5b), 部分 Tur-N2 电气石边部 Fe、Al 含量升高, Ca、Ti 含量有所下降(图 5c、图 5d)。Tur-V 电气石振荡环带从核部到边部 Fe、Al 含量下降, Mg、Ca、Ti 含量升高(图 5e、图 5f), 部分 Tur-V 电气石从核部到边部 Mg、Fe 含量变化明显(图 5g、图 5h)。



a. Tur-D2 电气石包裹 Tur-D1 电气石(核部)并形成核-边结构, 样品 PC-35; b. Tur-D1 电气石包裹有石英和长石, 样品 PC-28; c. 墨绿色 Tur-N1 电气石, 样品 PC24-1; d. Tur-N1 电气石中包裹斜长石, 样品 PC24-1; e. Tur-N2 电气石的核-边结构, 样品 PC24-32; f. Tur-N2 电气石的核-边结构, 样品 PC24-46; g. Tur-V 电气石的振荡环带与简单环带, 样品 PC24-38; h. Tur-d 电气石紧靠黑云母并发育振荡环带, 有细脉与黑云母相连, 样品 PC24-12; i. 磁铁矿沿 Tur-d 电气石边部或裂隙分布, 样品 PC24-11; b 为正交偏光照片, 上述除 b 外均为单偏光照片; Tur. 电气石; Qz. 石英; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Bt. 黑云母; Mt. 磁铁矿

图3 漂池岩体中不同类型电气石显微特征

Fig. 3 Photomicrographs of different types of tourmaline from the Piaoichi pluton

漂池岩体中电气石 Al 含量变化较大, Tur-D1 电气石 Al 含量大于 6 apfu(平均值为 6.47 apfu), 而 Tur-D2、Tur-N1、Tur-N2、Tur-V 和 Tur-d 电气石 Al 含量基本不超过 6.10 apfu(平均值分别为 6.09 apfu、6.07 apfu、5.85 apfu、5.86 apfu、5.73 apfu)。在 Fe-Mg 矢量替换图解中(图 4c), Tur-N1、Tur-N2、Tur-V 和大多数 Tur-d 电气石显示出与  $\text{MgFe}_{-1}$  替换机制相对应的负相关特征, 而 Tur-D1、Tur-D2 及少量 Tur-d 电气石 Mg、Fe 含量相关性则并不明显。在 Na- $X_{\text{vac}}$  和 Al-Fe 矢量替换图解中(图 4d、图 4f),  $X_{\text{vac}}$  与 Na 呈负相关性, Al 和 Fe 相关性不明显, 表明电气石<sup>Y</sup>Al 含量受控于(Na, Mg)

( $X_{\text{vac}}, \text{Al}$ )<sub>-1</sub> 和 ( $\text{Mg}, \text{OH}$ ) ( $\text{Al}, \text{O}$ )<sub>-1</sub> 替换机制。此外, 电气石中 Mg 和 Ca 含量呈正相关性, 指示 ( $\text{Ca}, \text{Mg}_2$ ) ( $X_{\text{vac}}, \text{Al}_2$ )<sub>-1</sub> 替换机制影响所有类型电气石中的 Ca 含量(图 4e)。

## 5.2 微量元素

漂池岩体中电气石 Li 含量均小于  $250 \times 10^{-6}$ , 表明其含锂端元可忽略不计。Zn( $317 \times 10^{-6} \sim 1461 \times 10^{-6}$ ) 和 Ga( $84.5 \times 10^{-6} \sim 204 \times 10^{-6}$ ) 含量较高, Be( $0.85 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$ )、Sc( $7.61 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$ )、V( $1.05 \times 10^{-6} \sim 242 \times 10^{-6}$ )、Cr( $< 399 \times 10^{-6}$ )、Co( $0.60 \times 10^{-6} \sim 32.9 \times 10^{-6}$ )、Ni( $0.29 \times 10^{-6} \sim 70.5 \times 10^{-6}$ )、Sr( $4.77 \times 10^{-6} \sim 222 \times 10^{-6}$ ) 和

表 1 漂池岩体中电气石主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果Tab. 1 Major (%) and trace ( $10^{-6}$ ) element compositions of tourmaline from the Piaoichi pluton

| 电气石<br>类型                      | Tur-D1           |          | Tur-D2           |          | Tur-N1            |          | Tur-N2           |          | Tur-V            |          | Tur-d            |          |
|--------------------------------|------------------|----------|------------------|----------|-------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|----------|
| 主量<br>元素                       | 范围<br>(N=27)     | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=108)    | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=14)      | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=85)     | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=55)     | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=78)     | 标准<br>偏差 |
| SiO <sub>2</sub>               | 34.66~<br>36.76  | 0.48     | 34.61~<br>36.34  | 0.34     | 34.92~<br>35.58   | 0.2      | 34.80~<br>37.22  | 0.43     | 35.12~<br>36.52  | 0.32     | 34.89~<br>37.01  | 0.54     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.23~<br>2.06    | 0.39     | 0.47~<br>2.71    | 0.41     | 0.41~<br>0.65     | 0.06     | 0.19~<br>1.66    | 0.28     | 0.25~<br>1.18    | 0.21     | 0.21~<br>1.29    | 0.21     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 31.44~<br>34.00  | 0.81     | 29.17~<br>33.95  | 0.75     | 31.13~<br>32.02   | 0.28     | 28.52~<br>33.24  | 1        | 29.84~<br>32.45  | 0.62     | 26.85~<br>33.12  | 1.36     |
| FeO                            | 7.37~<br>8.94    | 0.47     | 7.09~<br>8.95    | 0.41     | 13.10~<br>14.77   | 0.57     | 8.83~<br>11.45   | 0.63     | 7.88~<br>11.50   | 0.8      | 2.35~<br>10.20   | 2.34     |
| MnO                            | 0.03~<br>0.14    | 0.03     | bdl~<br>0.14     | 0.03     | 0.04~<br>0.12     | 0.03     | 0.04~<br>0.14    | 0.02     | 0.07~<br>0.25    | 0.05     | bdl~<br>0.13     | 0.03     |
| MgO                            | 2.34~<br>4.32    | 0.54     | 4.70~<br>6.56    | 0.31     | 1.66~<br>2.86     | 0.45     | 3.14~<br>6.80    | 0.79     | 3.22~<br>6.26    | 0.73     | 5.02~<br>7.21    | 0.5      |
| CaO                            | 0.24~<br>1.10    | 0.22     | 0.46~<br>1.11    | 0.13     | 0.23~<br>0.43     | 0.06     | 0.18~<br>1.00    | 0.21     | 0.10~<br>0.86    | 0.22     | 0.31~<br>1.17    | 0.18     |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.79~<br>2.29    | 0.13     | 1.84~<br>2.46    | 0.13     | 1.78~<br>2.04     | 0.07     | 1.61~<br>2.35    | 0.16     | 1.61~<br>2.21    | 0.12     | 1.88~<br>2.48    | 0.13     |
| K <sub>2</sub> O               | bdl~<br>0.11     | 0.02     | 0.01~<br>0.10    | 0.02     | 0.04~<br>0.08     | 0.01     | 0.02~<br>0.07    | 0.01     | 0.03~<br>0.19    | 0.02     | bdl~<br>0.12     | 0.02     |
| Total                          | 82.08~<br>86.25  | 0.94     | 83.57~<br>86.52  | 0.51     | 85.28~<br>86.43   | 0.36     | 84.76~<br>87.06  | 0.45     | 84.08~<br>86.16  | 0.39     | 74.80~<br>86.58  | 3.21     |
| F                              | 0.11~<br>0.51    | 0.08     | 0.14~<br>0.56    | 0.08     | 0.14~<br>0.41     | 0.07     | 0.10~<br>0.66    | 0.12     | 0.08~<br>0.56    | 0.12     | 0.16~<br>0.58    | 0.11     |
| *B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.26~<br>10.85  | 0.14     | 10.69~<br>11.08  | 0.07     | 10.49~<br>10.72   | 0.06     | 10.68~<br>11.14  | 0.1      | 10.62~<br>10.97  | 0.09     | 9.67~<br>11.11   | 0.37     |
| *Li <sub>2</sub> O             | 0.69~<br>1.20    | 0.12     | 0.90~<br>1.48    | 0.09     | 0.86~<br>1.05     | 0.04     | 0.77~<br>1.59    | 0.19     | 0.74~<br>1.31    | 0.15     | 0.92~<br>1.89    | 0.19     |
| *H <sub>2</sub> O              | 3.34~<br>3.61    | 0.06     | 3.48~<br>3.66    | 0.04     | 3.46~<br>3.61     | 0.04     | 3.47~<br>3.65    | 0.04     | 3.44~<br>3.63    | 0.04     | 3.22~<br>3.73    | 0.12     |
| Total                          | 96.57~<br>101.56 | 1.1      | 99.17~<br>102.50 | 0.62     | 100.19~<br>101.60 | 0.43     | 99.95~<br>103.10 | 0.64     | 99.53~<br>101.84 | 0.53     | 89.54~<br>102.64 | 3.56     |
| O                              |                  |          | 31               |          |                   |          |                  |          | 31               |          |                  |          |
| Si                             | 5.76~<br>6.11    | 0.072    | 5.53~<br>5.85    | 0.051    | 5.67~<br>5.82     | 0.043    | 5.65~<br>5.93    | 0.063    | 5.65~<br>5.92    | 0.063    | 5.58~<br>6.49    | 0.237    |
| B                              | 3                | 0        | 3                | 0        | 3                 | 0        | 3                | 0        | 3                | 0        | 3                | 0        |
| Al                             | 6.14~<br>6.70    | 0.15     | 5.59~<br>6.42    | 0.14     | 6.00~<br>6.15     | 0.043    | 5.28~<br>6.35    | 0.226    | 5.65~<br>6.26    | 0.148    | 5.29~<br>6.19    | 0.223    |
| Ti                             | 0.03~<br>0.26    | 0.05     | 0.06~<br>0.33    | 0.049    | 0.05~<br>0.08     | 0.008    | 0.02~<br>0.20    | 0.034    | 0.03~<br>0.14    | 0.026    | 0.03~<br>0.15    | 0.025    |
| Mg                             | 0.59~<br>1.04    | 0.123    | 1.13~<br>1.53    | 0.07     | 0.41~<br>0.70     | 0.108    | 0.76~<br>1.59    | 0.177    | 0.78~<br>1.48    | 0.168    | 1.24~<br>1.68    | 0.111    |
| Mn                             | 0.00~<br>0.02    | 0.004    | 0.00~<br>0.02    | 0.004    | 0.01~<br>0.02     | 0.004    | 0.01~<br>0.02    | 0.003    | 0.01~<br>0.03    | 0.006    | 0.00~<br>0.02    | 0.004    |
| Fe                             | 1.03~<br>1.24    | 0.064    | 0.94~<br>1.20    | 0.056    | 1.78~<br>2.02     | 0.082    | 1.18~<br>1.55    | 0.09     | 1.05~<br>1.55    | 0.115    | 0.34~<br>1.37    | 0.3      |
| Ca                             | 0.04~<br>0.19    | 0.039    | 0.08~<br>0.19    | 0.022    | 0.04~<br>0.08     | 0.011    | 0.03~<br>0.17    | 0.036    | 0.02~<br>0.15    | 0.037    | 0.05~<br>0.21    | 0.03     |
| Na                             | 0.58~<br>0.74    | 0.045    | 0.57~<br>0.75    | 0.038    | 0.56~<br>0.64     | 0.021    | 0.51~<br>0.72    | 0.045    | 0.51~<br>0.69    | 0.035    | 0.58~<br>0.77    | 0.041    |

续表 1

| 电气石<br>类型        | Tur-D1        |          | Tur-D2        |          | Tur-N1        |          | Tur-N2         |          | Tur-V         |          | Tur-d         |          |
|------------------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|----------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| 主量<br>元素         | 范围<br>(N=27)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=108) | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=14)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=85)   | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=55)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=78)  | 标准<br>偏差 |
| K                | 0.00~<br>0.02 | 0.004    | 0.00~<br>0.02 | 0.003    | 0.01~<br>0.02 | 0.002    | 0.00~<br>0.01  | 0.003    | 0.01~<br>0.04 | 0.004    | 0.00~<br>0.02 | 0.004    |
| F                | 0.06~<br>0.27 | 0.045    | 0.07~<br>0.28 | 0.041    | 0.07~<br>0.21 | 0.036    | 0.05~<br>0.33  | 0.061    | 0.04~<br>0.28 | 0.061    | 0.08~<br>0.29 | 0.056    |
| Al(VI)           | 0.00~<br>0.24 | 0.059    | 0.15~<br>0.47 | 0.051    | 0.18~<br>0.33 | 0.043    | 0.07~<br>0.37  | 0.064    | 0.08~<br>0.35 | 0.063    | 0.00~<br>0.42 | 0.132    |
| Al(Y)            | 0.09~<br>0.70 | 0.164    | 0.00~<br>0.15 | 0.017    | 0.00~<br>0.00 | 0        | 0.00~<br>0.17  | 0.035    | 0.00~<br>0.14 | 0.025    | 0.00~<br>0.09 | 0.015    |
| Al(Z)            | 6.00~<br>6.00 | 0        | 5.33~<br>6.00 | 0.143    | 5.73~<br>5.94 | 0.059    | 4.99~<br>6.00  | 0.252    | 5.38~<br>6.00 | 0.187    | 5.07~<br>6.00 | 0.24     |
| Mg(Z)            | 0.00~<br>0.00 | 0        | 0.00~<br>0.67 | 0.143    | 0.06~<br>0.27 | 0.059    | 0.00~<br>1.01  | 0.252    | 0.00~<br>0.62 | 0.187    | 0.00~<br>0.93 | 0.24     |
| Y total          | 2.20~<br>2.53 | 0.079    | 2.07~<br>2.42 | 0.057    | 2.31~<br>2.43 | 0.028    | 2.00~<br>2.50  | 0.116    | 2.15~<br>2.52 | 0.096    | 1.63~<br>2.41 | 0.148    |
| Li               | 0.47~<br>0.80 | 0.079    | 0.58~<br>0.93 | 0.057    | 0.57~<br>0.69 | 0.028    | 0.50~<br>1.00  | 0.116    | 0.48~<br>0.85 | 0.096    | 0.59~<br>1.37 | 0.148    |
| X <sub>vac</sub> | 0.13~<br>0.35 | 0.075    | 0.10~<br>0.29 | 0.042    | 0.28~<br>0.38 | 0.026    | 0.15~<br>0.45  | 0.07     | 0.19~<br>0.47 | 0.063    | 0.07~<br>0.33 | 0.051    |
| OH               | 3.73~<br>3.94 | 0.045    | 3.72~<br>3.93 | 0.041    | 3.79~<br>3.93 | 0.036    | 3.67~<br>3.95  | 0.061    | 3.72~<br>3.96 | 0.061    | 3.71~<br>3.92 | 0.056    |
| 微量<br>元素         | 范围<br>(N=16)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=45)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=8)   | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=50)   | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=29)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=36)  | 标准<br>偏差 |
| Li               | 72.3~<br>167  | 27.2     | 54.5~<br>164  | 25.9     | 100~<br>221   | 54.9     | 55.6~<br>225   | 42.3     | 114~<br>232   | 32.4     | 46.8~<br>102  | 14.7     |
| Be               | 0.85~<br>16.3 | 4.57     | 2.22~<br>120  | 30.2     | 7.11~<br>23.8 | 5.06     | 2.83~<br>23.8  | 4.07     | 5.11~<br>30.8 | 4.92     | 1.56~<br>19.2 | 4.71     |
| Sc               | 12.3~<br>34.2 | 7.96     | 8.90~<br>42.5 | 7.37     | 7.61~<br>43.5 | 13.7     | 9.51~<br>117   | 19.7     | 12.6~<br>85.1 | 18.4     | 18.8~<br>69.1 | 13.4     |
| V                | 70.4~<br>166  | 21.8     | 63.6~<br>170  | 25.7     | 2.35~<br>5.82 | 1.13     | 1.05~<br>207   | 59.9     | 63.1~<br>150  | 19.2     | 121~<br>242   | 32.3     |
| Co               | 14.3~<br>24.9 | 2.76     | 14.5~<br>25.7 | 1.98     | 7.77~<br>11.8 | 1.64     | 0.60~<br>32.9  | 8.52     | 6.46~<br>26.3 | 5.18     | 10.1~<br>24.4 | 4.22     |
| Ni               | 13.9~<br>57.7 | 13       | 17.1~<br>54.1 | 8.77     | 0.29~<br>7.01 | 2.47     | 0.46~<br>50.3  | 14.4     | 4.17~<br>53.5 | 12.3     | 11.7~<br>70.5 | 16       |
| Zn               | 328~<br>442   | 38.2     | 317~<br>433   | 29.1     | 1252~<br>1461 | 81.2     | 395~<br>716    | 64.4     | 490~<br>872   | 87.4     | 346~<br>515   | 43.5     |
| Rb               | bdl~<br>7.52  | 1.87     | bdl~<br>20.2  | 3.11     | bdl~<br>0.99  | 0.4      | bdl~<br>4.14   | 0.6      | bdl~<br>3.39  | 0.82     | bdl~<br>28.5  | 5.76     |
| Sr               | 40.2~<br>65.8 | 8.48     | 47.7~<br>135  | 15.3     | 4.77~<br>6.96 | 0.99     | 15.2~<br>222   | 39.2     | 13.3~<br>102  | 21.6     | 50.8~<br>135  | 19.1     |
| Nb               | 0.01~<br>0.55 | 0.16     | bdl~<br>1.10  | 0.21     | 0.78~<br>12.1 | 4.17     | 0.01~<br>1.10  | 0.23     | 0.02~<br>0.98 | 0.23     | 0.03~<br>0.88 | 0.21     |
| Sn               | 6.91~<br>127  | 36.5     | 6.83~<br>73.1 | 15.3     | 64.0~<br>452  | 143      | 8.28~<br>172   | 33.5     | 17.9~<br>109  | 20.8     | 8.71~<br>63.3 | 13.9     |
| La               | 0.44~<br>7.03 | 1.55     | 2.73~<br>8.77 | 1.44     | 1.29~<br>2.02 | 0.23     | 0.40~<br>7.07  | 1.85     | 0.95~<br>8.58 | 2.21     | 0.53~<br>10.5 | 2.56     |
| Ce               | 0.87~<br>11.0 | 2.5      | 4.86~<br>18.7 | 2.6      | 2.61~<br>3.90 | 0.46     | 0.57~<br>10.7  | 2.95     | 1.83~<br>15.2 | 3.61     | 0.94~<br>16.7 | 4.16     |
| Pr               | 0.09~<br>1.04 | 0.24     | 0.40~<br>1.82 | 0.27     | 0.18~<br>0.32 | 0.06     | 0.001~<br>0.90 | 0.26     | 0.16~<br>1.40 | 0.32     | 0.10~<br>1.53 | 0.34     |

续表 1

| 电气石<br>类型 | Tur-D1        |          | Tur-D2        |          | Tur-N1        |          | Tur-N2        |          | Tur-V         |          | Tur-d         |          |
|-----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| 微量元素      | 范围<br>(N=16)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=45)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=8)   | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=50)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=29)  | 标准<br>偏差 | 范围<br>(N=36)  | 标准<br>偏差 |
| Nd        | 0.18~<br>2.98 | 0.8      | 0.99~<br>6.21 | 0.98     | 0.36~<br>1.79 | 0.42     | 0.11~<br>3.90 | 0.88     | 0.70~<br>3.80 | 0.81     | 0.15~<br>3.79 | 1.01     |
| Sm        | bdl~<br>0.53  | 0.13     | bdl~<br>1.30  | 0.25     | bdl~<br>0.39  | 0.13     | bdl~<br>1.00  | 0.21     | bdl~<br>0.95  | 0.21     | bdl~<br>0.61  | 0.16     |
| Eu        | 0.04~<br>0.32 | 0.08     | 0.05~<br>0.65 | 0.12     | bdl~<br>0.10  | 0.04     | bdl~<br>0.59  | 0.12     | 0.01~<br>0.35 | 0.09     | 0.08~<br>0.70 | 0.14     |
| Gd        | bdl~<br>0.35  | 0.1      | bdl~<br>1.17  | 0.2      | bdl~<br>0.27  | 0.1      | bdl~<br>0.48  | 0.12     | bdl~<br>0.54  | 0.12     | bdl~<br>0.29  | 0.08     |
| Tb        | bdl~<br>0.07  | 0.02     | bdl~<br>0.13  | 0.03     | bdl~<br>0.03  | 0.01     | bdl~<br>0.08  | 0.02     | bdl~<br>0.10  | 0.03     | bdl~<br>0.05  | 0.01     |
| Dy        | bdl~<br>0.21  | 0.07     | bdl~<br>0.59  | 0.12     | bdl~<br>0.12  | 0.04     | bdl~<br>0.22  | 0.07     | bdl~<br>0.44  | 0.1      | bdl~<br>0.22  | 0.05     |
| Ho        | bdl~<br>0.10  | 0.03     | bdl~<br>0.13  | 0.02     | bdl~<br>0.05  | 0.02     | bdl~<br>0.04  | 0.01     | bdl~<br>0.09  | 0.02     | bdl~<br>0.31  | 0.01     |
| Er        | bdl~<br>0.39  | 0.1      | bdl~<br>0.47  | 0.08     | bdl~<br>0.03  | 0.01     | bdl~<br>0.17  | 0.03     | bdl~<br>0.10  | 0.02     | bdl~<br>0.13  | 0.03     |
| Tm        | bdl~<br>0.03  | 0.01     | bdl~<br>0.05  | 0.01     | bdl~<br>0.06  | 0.02     | bdl~<br>0.04  | 0.01     | bdl~<br>0.06  | 0.01     | bdl~<br>0.03  | 0.01     |
| Yb        | bdl~<br>0.30  | 0.1      | bdl~<br>0.44  | 0.09     | bdl~<br>0.21  | 0.08     | bdl~<br>0.29  | 0.06     | bdl~<br>0.41  | 0.1      | bdl~<br>0.18  | 0.05     |
| Lu        | bdl~<br>0.07  | 0.02     | bdl~<br>0.10  | 0.02     | bdl~<br>0.01  | —        | bdl~<br>0.03  | 0.01     | bdl~<br>0.09  | 0.02     | bdl~<br>0.03  | 0.01     |
| Ta        | bdl~<br>0.78  | 0.26     | bdl~<br>1.40  | 0.24     | 0.29~<br>12.7 | 4.8      | bdl~<br>0.32  | 0.08     | bdl~<br>0.51  | 0.19     | bdl~<br>0.66  | 0.16     |
| Pb        | 4.29~<br>13.3 | 2.42     | 6.92~<br>35.2 | 5.54     | 3.05~<br>5.79 | 1.1      | 1.98~<br>26.6 | 5.42     | 4.02~<br>21.8 | 4.23     | 7.95~<br>56.4 | 7.81     |

注：通过八面体与四面体(Y+Z+T)与15种阳离子和31种阴离子(Henry et al., 2011)的通式计算电气石结构式，通过OH+F=4和B=3归一化(Henry et al., 2011)计算出\*B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、\*Li<sub>2</sub>O和\*H<sub>2</sub>O；N表示分析点个数；bdl表示元素含量低于检出限；—表示因多数分析低于检出限而无法获得相应均值及标准偏差。

Sn( $6.83\times10^{-6}\sim452\times10^{-6}$ )含量变化较大,可达几个数量级,而 Mo、Cs、Cd、Sb、Hf、Bi、Th、U 和大部分 REE 含量很低(小于  $1\times10^{-6}$ ),有的低于检出限(表 1)。

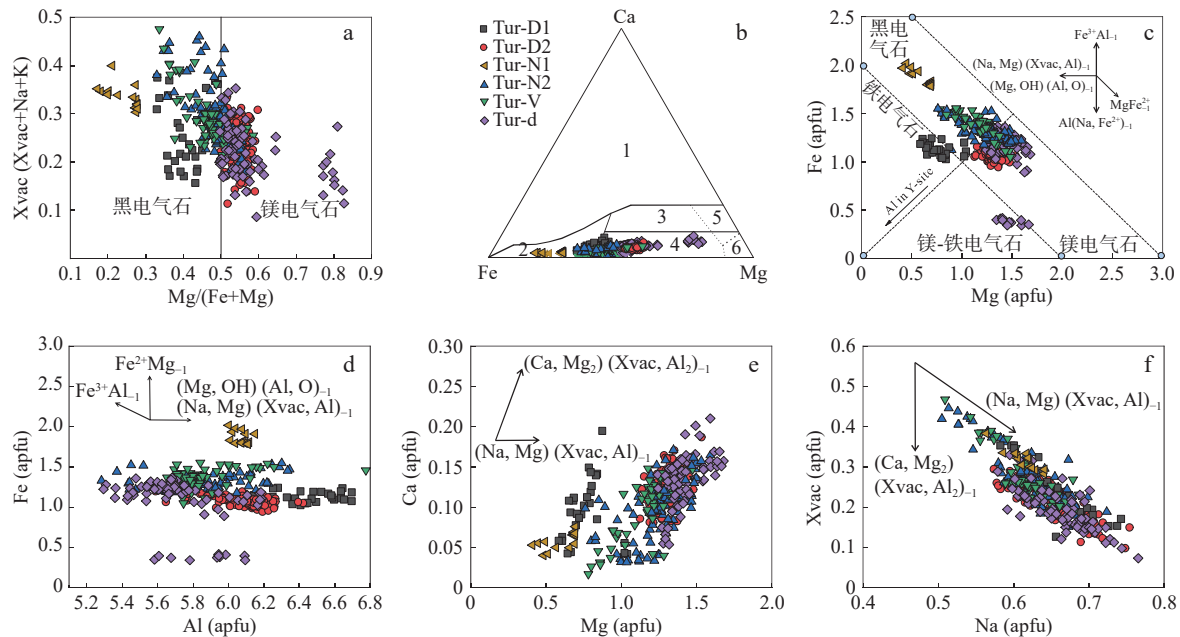
Tur-N1 电气石微量元素含量明显不同于其他类型电气石,具有低 V、Sr,高 Nb、Ta、Zn、Sn 的特点,Tur-d 电气石具有相对较高的 V、Pb、Sr 含量,而 Tur-D 电气石 Nb、Ta、Sn 含量相对较低,不同类型电气石 Sc 含量变化较小(图 6)。与 Tur-V 电气石相比,Tur-N2 电气石 Zn、Sn 含量略低并且 V、Sn 含量变化较大(图 6a、图 6d、图 6h)。此外,部分类型电气石微量与主量元素具有相关性(图 6)。Tur-N2 和 Tur-V 电气石 Nb 含量与 Mg/(Mg+Fe)值负相关(图 6e),Tur-N2 电气石 Sn 和 Sc 含量、Tur-V 电气石 Sc 和 V 含量与 Mg/(Mg+Fe)值正相关(图 6a、图 6b、图 6d),Tur-N2 和 Tur-V 电气石中 Sr、Pb 以及稀土元素(REE)均与 Na/(Na+Ca)负相

关(图 6f、图 6g、图 6l)。

## 6 讨论

### 6.1 电气石成因

前人研究表明,岩浆成因电气石成分较均一,且以高 Fe/Mg 值和 Y 位具有高 Al 阳离子数为特征,而热液成因电气石通常存在分带性,且可见电气石交代穿插早期形成矿物,以富 Mg 且 Y 位低 Al 或无 Al 为特征,并趋向于黑-镁电气石中的镁电气石端元(London et al., 1996)。漂池岩体中浸染状 Tur-D1 与 Tur-D2 电气石分别为黑电气石和镁电气石(图 4a),因此二者可能具有不同成因。Tur-D1 电气石与石英、长石相互包裹(图 3b),表明其可能与造岩矿物同期形成,并且其 Mg/(Fe+Mg)值平均为 0.4(<0.5),Y 位上存在



a.  $Mg/(Fe+Mg)$ - $X_{vac}/(X_{vac}+Na+K)$  分类图解(据 Henry et al., 2011); b. Ca-Fe-Mg 三元图解(底图据 Henry et al., 1985), 1 为富 Li 花岗岩及相关伟晶岩、细晶岩, 2 为贫 Li 花岗岩及相关伟晶岩、细晶岩, 3 为富 Ca 变质泥岩、变质砂岩及钙硅酸盐, 4 为贫 Ca 变质泥岩、变质砂岩和石英-电气石岩, 5 为变质碳酸盐岩, 6 为变超镁铁质岩; c. Mg-Fe 图解; d. Al-Fe 图解; e. Mg-Ca 图解; f. Na-Xvac 成分替换图解

图4 漂池岩体中电气石图解

Fig. 4 Plots of tourmaline from the Piaochi pluton

大量 Al(0.09~0.70 apfu), 与岩浆电气石特征一致(London et al., 1996; 高永宝等, 2025)。因此, Tur-D1 可能结晶于花岗质熔体, 为岩浆电气石。Tur-D2 电气石 Mg 含量较高(图 4e), Y 位基本不含 Al, 而且与贫 Ca 变质泥岩和变质砂岩中形成的电气石具有相似的 Ca、Mg 和 Fe 组成(图 4b), 不同于岩浆电气石特征。因此, Tur-D2 可能是在外部流体作用下结晶的热液电气石。此外, 在 Tur-D1 电气石被 Tur-D2 电气石交代形成的核-边结构中, 核部与边部界线不规则(图 3a), 指示 Tur-D1 电气石形成之后被富 B 流体溶蚀。

石英-电气石结核普遍存在于花岗岩体中, 关于其成因主要有以下 3 种不同认识。①外来富 B 流体在岩浆期后通过微裂隙的渗入和扩散作用形成(Rozendaal et al., 1995); ②晚期从共存花岗质岩浆中分离出的不混溶含水富 B 熔体或流体结晶形成(Drivenes et al., 2015); ③岩浆演化晚期聚集的富 B 花岗质熔体直接结晶形成(Perugini et al., 2007)。漂池岩体中部分 Tur-N 电气石呈他形充填于石英、斜长石颗粒之间(图 3e), 并且存在被电气石包裹的斜长石(图 3d), 表明 Tur-N 电气石在结核中结晶较晚。此外, 虽然 Tur-N 电气石 Y 位基本不含 Al, 不同于岩浆电气

石特征, 但却在 Ca-Fe-Mg 三元图解中表现出与贫 Li 花岗岩密切相关性(图 4b)。因此, 石英-电气石结核可能并非直接结晶于富 B 熔体, 而是形成于花岗岩结晶晚期分离出的不混溶含水富 B 热液, 记录了从岩浆到热液过程的转变。

虽然 Tur-N1 和 Tur-N2 电气石均发育于石英-电气石结核, 但含 Tur-N1 电气石的结核通常孤立分布在岩体中, 未在露头或者薄片中发现明显裂隙与之相连, 表明其基本未受外部流体影响。而在含 Tur-N2 电气石的结核外, 可见电气石细脉与部分浅色晕相接(图 2d), 指示其形成于一个开放环境。相较于岩浆电气石 Tur-D1, 形成于晚期不混溶含水富 B 热液的 Tur-N1 电气石 Mg 含量有所下降(图 4e), 与大多数长英质熔体向 Mg 含量降低的方向演化趋势一致(Ji et al., 2023), 而 Tur-N2 电气石 Mg 含量升高(图 4e), 具有从黑电气石向镁电气石过渡的趋势(图 4a)。Tur-N2 电气石在 Ca-Fe-Mg 三元图解中落入与贫锂花岗岩和贫钙变质泥岩、变质砂岩相关的范围内(图 4b)。因此, Tur-N2 电气石可能反映的不仅仅只是含水富 B 岩浆热液的持续演化, 其中可能有来自于围岩的富 Mg 流体加入。

Tur-V 具有与 Tur-N2 电气石相似的成分特征, 以

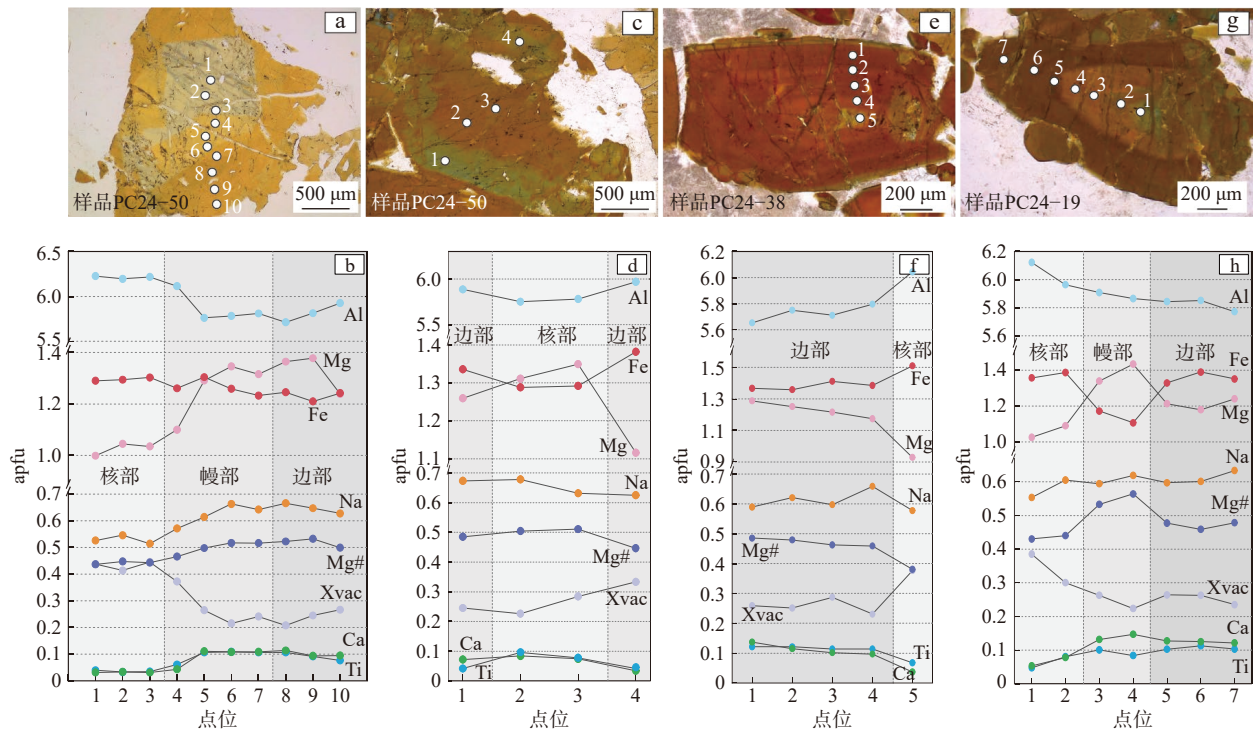


图5 漂池岩体中 Tur-N2 和 Tur-V 电气石环带成分剖面图

Fig. 5 Compositional zonation profile of Tur-N2 and Tur-V tourmaline from the Piaoichi pluton

黑电气石为主(图 4a), 也在 Ca-Fe-Mg 三元图解中落入与贫锂花岗岩和贫钙变质泥岩、变质砂岩相关的区域内(图 4b), 但 Tur-V 电气石相较于其他类型电气石具有明显高的 Mn 含量(0.01~0.03 apfu)。随着岩浆演化, 富 B 熔体中 MnO 含量的增加会导致 Mn/Fe 值的升高(Yu et al., 2024; 王利波等, 2025)。漂池岩体中从 Tur-N1、Tur-N2 到 Tur-V 电气石 Mn/Fe 比值逐渐增大(分别为 0.005 9、0.009 1 和 0.014 3)可能反映了其 MnO 含量的逐渐升高。因此, 电气石-石英脉可能形成于 Tur-N2 电气石形成后含水富 B 岩浆热液的进一步分离和演化, 其中也有部分来自于围岩的富 Mg 流体加入。

富 B 流体产生和迁移过程中可能与花岗岩体中已结晶的黑云母发生反应形成电气石和磁铁矿(成里宁等, 2019)。漂池岩体边部电气石化带中 Tur-d 电气石多沿片麻理分布, 与黑云母关系密切并发育振荡环带(图 3h), 在部分电气石的边部及裂隙处可见磁铁矿(图 3i), 结晶明显晚于造岩矿物, 表明漂池岩体固结后可能存在富 B 流体与黑云母反应。此外, 富 B 流体与岩体内部黑云母及局部围岩发生强烈水岩反应会形成电气石化带、网脉和蚀变晕, 假象仍保留原黑云母片理, 并切割早期岩浆构造和岩浆-热液电气石(Bosi

et al., 2019)。因此, 漂池岩体边部电气石化带中沿片麻理分布的 Tur-d 可能是后期热液交代成因电气石。

## 6.2 电气石对岩体岩浆-热液过程的指示

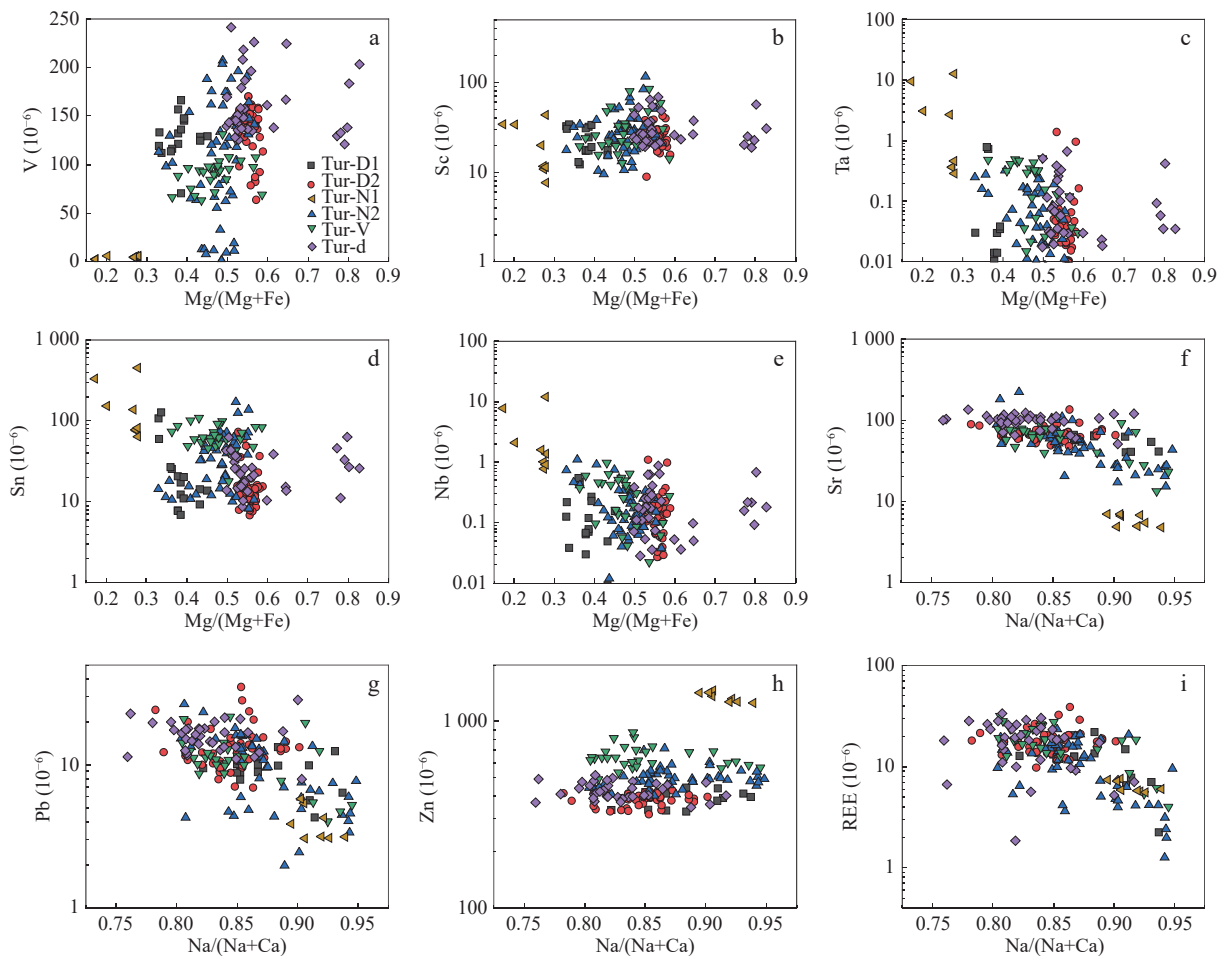
电气石微量元素含量能够记录其结晶体系流体或熔体成分特征, 并用来反映花岗岩熔/流体的演化过程(van Hinsberg, 2011b)。Tur-D1 与 Tur-N1 电气石之间的成分变化能够反映漂池岩体冷凝晚期岩浆-热液的演化过程, 其元素含量变化未受外部流体影响(图 7a、图 7b), 主要受控于元素在流体/熔体中的相容性、迁移性或其它矿物的结晶。相对封闭岩浆系统中, V 常被用来指示电气石形成的早晚(Yang et al., 2015), 在岩浆结晶过程中优先进入钛铁矿、黑云母和电气石等矿物中, 从而使岩浆中 V 含量降低(van Hinsberg, 2011b)。因此, 岩浆阶段结晶的电气石 V 含量最高, 而进入岩浆-热液过渡阶段后, V、Ti 等元素含量均明显降低, 热液成因电气石 V 含量通常很低(Duchoslav et al., 2017)。漂池岩体 Tur-N1 电气石 V 含量( $2.35 \times 10^{-6} \sim 5.82 \times 10^{-6}$ )远低于 Tur-D1 电气石(V 值为  $70.4 \times 10^{-6} \sim 166 \times 10^{-6}$ ; 图 6a), 表明 Tur-D1 电气石结晶早于 Tur-N1 电气石(图 7a、图 7b)。此外, Tur-N1 电气石具有高 Zn 含量(图 6h), 而相对于硅酸盐熔体, Zn 更易进入含水流体(Zhao et al., 2021), 因此形成于晚期不

混溶含水富 B 岩浆热液的 Tur-N1 电气石可能代表了岩浆-热液演化过程中的首次热液分离(图 7b)。

Tur-N2 相较于 Tur-N1 电气石有明显环带结构(图 3f、图 5a), 从核部到边部 Al、Mg、Na、Ti、Ca 含量明显变化(图 5b)。Na 从核部到边部的富集可能反映了岩浆-热液的进一步演化(图 5b), 即相对于共存熔体, Na 更易进入岩浆热液中(Badanina et al., 2004)。Liu et al.(2023)认为结晶于岩浆热液且没有围岩物质加入的电气石会具有富铁贫钙特征, 而且电气石 Mg、Ca 含量能够用来指示花岗岩伟晶岩熔体受改造的程度(Bai et al., 2023)。因此, Tur-N2 电气石 Ca、Mg 含量在幔部的突然升高(图 5b)可能反映了围岩(变沉积岩)物质的加入, 而 Tur-N2 电气石代表了外部流体参与下岩浆热液的再次分离(图 7c)。在部分 Tur-N2 电气石中发育有高 Fe 而低 Ca、Mg 的边部(图 5c、图 5d), 具

有岩浆热液电气石特征, 并且边部与核部接触界线不平直(图 3e), 表明 Tur-N2 电气石形成后可能存在岩浆热液对其交代。因此, 漂池岩体可能存在 3 次不混溶含水富 B 热液的分离, 而 Tur-N2 电气石边部的高 Fe 含量可能暗示了 Tur-V 电气石形成时第三次岩浆热液分离的发生(图 7d)。

漂池岩体电气石-石英脉宽度变化较大, 并在中-细脉电气石中出现振荡环带(图 3g、图 5e)。关于热液电气石振荡环带的成因, 主要有以下 3 种认识。①由于流体性质(压力、温度等)发生变化而导致结晶条件发生周期性变化; ②晶体生长速率的变化; ③流体-岩石的相互作用或外部流体的注入(Bosi et al., 2018)。在温度下降时, 电气石会向镁电气石端元演化, 其快速生长可能表现出均匀的振荡环带(Bosi et al., 2018)。漂池岩体中 Tur-V 电气石振荡环带边界规则, 但并非



a. V 与  $Mg/(Mg+Fe)$ ; b. Sc 与  $Mg/(Mg+Fe)$ ; c. Ta 与  $Mg/(Mg+Fe)$ ; d. Sn 与  $Mg/(Mg+Fe)$ ; e. Nb 与  $Mg/(Mg+Fe)$ ; f. Sr 与  $Na/(Na+Ca)$ ; g. Pb 与  $Na/(Na+Ca)$ ; h. Zn 与  $Na/(Na+Ca)$ ; i. REE 与  $Na/(Na+Ca)$

图6 漂池岩体电气石元素相对图解

Fig. 6 Plots of element pair for the tourmaline from the Piaochi pluton

所有 Tur-V 电气石从核部到边部的成分变化均表现出  $Mg/(Fe+Mg)$  值连续升高向镁电气石端元演化的特征(图 5f、图 5h), 指示可能存在两种流体来源。一种为富 Fe 岩浆热液, 另一种为富 Mg、Ca 的围岩流体, 反映了 Tur-V 电气石振荡环带可能是受外部流体注入和晶体快速生长的控制。

此外, 漂池岩体中电气石成分对其结晶时的流体/熔体环境具有指示意义。漂池岩体中 Tur-D1、Tur-N 和 Tur-V 电气石主量元素之间存在多种替换机制(图 4c~图 4f), 但无  $Fe^{3+}Al_{-1}$  替换机制(图 4c、图 4d), 指示流体(或熔体)中较低的  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  值, 表明其形成于相对还原的环境。此外, 电气石 X 位成分能反映共存流体成分特征, Tur-N 和 Tur-V 电气石表现出  $(Na, Mg)(X_{vac}, Al)_{-1}$  和  $(Mg, OH)(Al, O)_{-1}$  替换机制以及 Na 在 X 位占位率逐渐升高的特征(图 4d、图 4f), 也表明与 Tur-N 和 Tur-V 电气石共存的岩浆热液 Na 含量较高, 具有相对高的盐度(Harlaux et al., 2020; Yu et al., 2024)。因此, 漂池岩体演化晚期整体处于较还原的环境并且其分离出的不混溶含水富 B 热液具有中高盐度的特征。

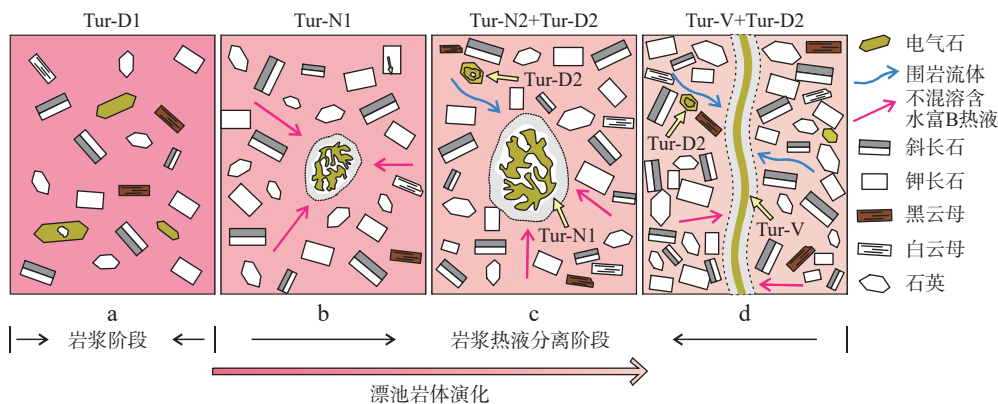
### 6.3 电气石成因对稀有金属成矿的指示意义

电气石中 Li、Nb 和 Ta 含量主要受熔体(或流体)成分的控制, 因此不但可以用来查明熔/流体的成分变化(Zhao et al., 2019), 还可用来揭示稀有金属富集过程并评价其成矿潜力(Liu et al., 2023)。漂池岩体中各类电气石 Li 含量相似(图 8a), 表明 Li 在岩浆-热液阶段的富集并不明显, 可能不具备形成 Li 矿的条件。然

而, Tur-N1 电气石 Ta、Sn 和 Nb 含量较高(图 6c、图 6d、图 6e), 暗示其在流体演化过程中发生过富集。通过与东秦岭无矿化伟晶岩(双峰村、碾盘、凤原)、弱铌钽铁矿化伟晶岩(丰庄)、铍矿化伟晶岩(街子沟)和锂矿化伟晶岩(蔡家沟)中电气石进行成分对比(图 8), 发现漂池岩体中 Tur-N1 电气石表现出与弱铌钽铁矿化伟晶岩中电气石相似的 V、Zn 特征, 并且 Tur-N1 电气石 Nb 含量(平均为  $3.46 \times 10^{-6}$ )明显高于东秦岭弱铌钽铁矿化伟晶岩中电气石中相应值(平均为  $0.46 \times 10^{-6}$ ; 凤永刚等, 2022), 表明与 Tur-N1 电气石共存的含水富 B 岩浆热液可能与 Nb-Ta 矿化有关。

然而, 前人并未报道与漂池岩体有关的 Nb-Ta 矿化, 可能是在岩体演化过程中物理化学条件的变化限制了 Nb-Ta 进一步富集。岩浆-热液矿床原生流体具有相对较低的氧逸度, 并在相对还原的环境中完成对成矿元素的富集, 而电气石生长过程中从  $MgFe_{-1}$  到  $Fe^{3+}Al_{-1}$  替换机制的转变能够反映共存流体从还原环境到氧化环境的转变, 氧逸度的升高有利于降低金属溶解度, 从而促进金属析出成矿(Qiu et al., 2021), 但漂池岩体电气石中无  $Fe^{3+}Al_{-1}$  替换机制。因此, 在 Tur-N 和 Tur-V 电气石所代表的岩浆热液阶段(图 7b、图 7c、图 7d), 漂池岩体较为还原的环境可能并不支持大量含 Nb-Ta 络合物的最终矿化。

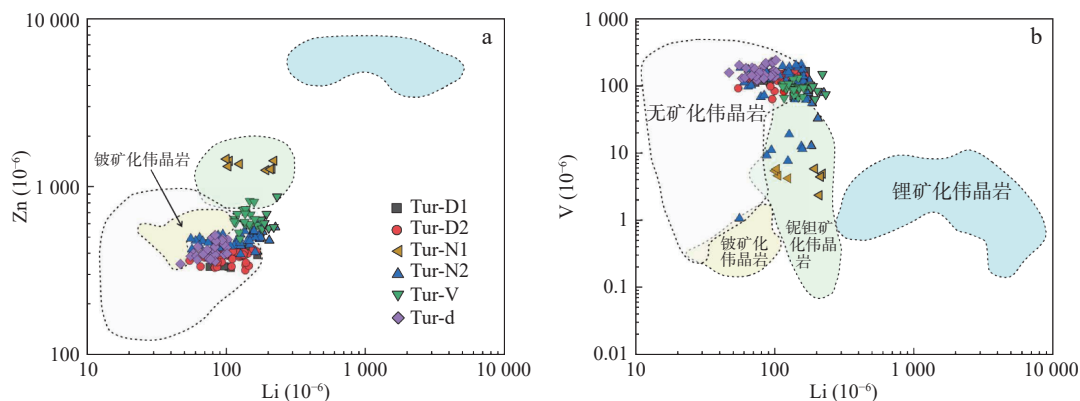
此外, 助溶剂元素(如 B、F、P)可以降低花岗质熔体粘度和固化温度, 增加稀有元素溶解度(Xie et al., 2020)。Bai et al. (2023) 认为相对封闭的花岗质熔体体系对稀有元素的超富集成矿极为有利, 其能够阻止溶



a. Tur-D1 电气石开始从岩浆中结晶; b. 不混溶含水富 B 热液开始从岩浆分离、聚集并结晶形成 Tur-N1 电气石; c. 围岩流体渗入并与不混溶含水富 B 热液混合结晶形成 Tur-N2 电气石; d. 岩体中不混溶含水富 B 热液进一步分离, 与围岩流体混合形成 Tur-V 电气石; 随着围岩流体加入, c、d 阶段的 Tur-D2 电气石开始结晶

图7 漂池岩体电气石成因模式图

Fig. 7 Genetic model of tourmaline in the Piaochi pluton



东秦岭伟晶岩中电气石元素含量引自凤永刚等(2022)

图8 漂池岩体中电气石 Li-Zn 含量(a)和 Li-V 含量(a)相对图解

Fig. 8 Plots of (a) Li vs. Zn and (b) Li vs. V of tourmaline from the Piaochi pluton

剂组分及稀有金属元素的迁出,进而影响成矿。漂池岩体中电气石多集中在边部且大多数为 Tur-N2 和 Tur-V 电气石,而 Tur-N1 电气石在整个岩体中的占比极低,表明其结晶所处的演化阶段在整个岩浆-热液演化过程中时间短、规模小,而 Tur-N2 和 Tur-V 电气石被认为不同程度地受到围岩流体的影响。因此,岩体与围岩的相互作用可能阻碍了漂池岩体在岩浆-热液阶段的 Nb-Ta 矿化。围岩流体进入岩体的同时也为岩浆热液排出提供了通道,岩体中助溶剂元素在向围岩流失、以及电气石等新矿物结晶过程中减少,进一步降低了 Nb-Ta 等元素的溶解度,阻碍了其在岩浆-热液过程中继续富集,从而影响了稀有金属矿化。

## 7 结论

(1)漂池花岗岩体中发育浸染状电气石(Tur-D)、石英-电气石结核(Tur-N)、电气石-石英脉(Tur-V)和沿片麻理分布的电气石(Tur-d)4类电气石。根据形态和成分,Tur-D 和 Tur-N 电气石可进一步划分为 Tur-D1、Tur-D2 和 Tur-N1、Tur-N2。

(2)Tur-D1 为岩浆电气石,结晶于花岗质熔体中,而 Tur-D2 是外部流体作用下结晶的热液电气石。Tur-N1、Tur-N2 和 Tur-V 电气石形成于岩浆结晶晚期分离出的不混溶含水富 B 热液,且 Tur-N2 和 Tur-V 电气石均受到不同程度的围岩富 Mg 流体影响。Tur-d 为岩体冷凝后热液交代成因电气石。

(3)岩体在热液阶段曾存在过短暂的 Nb-Ta 富集过程,但由于较还原的环境及与围岩较强烈的相互作用,阻碍了 Nb 和 Ta 进一步富集成矿。因此,花岗质

熔体在演化晚期岩浆-热液阶段能否形成稀有金属矿床仍受控于流体的氧化还原状态及与围岩的相互作用。

致谢: 长安大学博士研究生李中州、岑炬标和硕士研究生郭腾龙在野外采样过程中提供了帮助,在此一并感谢!

## 利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 参考文献(References):

- 陈西京,王淑荣,张秀颖. 秦岭花岗伟晶岩基本特征或成矿作用[M]. 北京:地质出版社,1993: 8-70.
- 成里宁,张超,杨晓松,等. 二云母花岗岩与含硼流体反应的实验研究:对电气石花岗岩成因的启示[J]. 中国科学:地球科学,2019,49(11): 1772-1787.
- CHENG Lining, ZHANG Chao, YANG Xiaosong, et al. Experimental investigation of reactions between two-mica granite and boron-rich fluids: Implications for the formation of tourmaline granite[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(11): 1772-1787.
- 凤永刚,梁婷,王梦玺,等. 东秦岭花岗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, 2022, 38(2): 428-451.
- FENG Yonggang, LIANG Ting, WANG Mengxi, et al. Geochemistry of tourmaline from granitic pegmatites in East Qinling and its implications for mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica,

- 2022 38(2): 428–444.
- 高永宝, 李航, 杨可, 等. 秦岭成矿带金成矿规律及资源潜力[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 23–43.
- GAO Yongbao, LI Hang, YANG Ke, et al. Gold Metallogenic Regularity and Resource Potential in the Qinling Metallogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2026, 59(1): 23–43.
- 高永宝, 吴欢欢, 李文渊, 等. 新疆 509 道班西锂矿电气石矿物学及 40Ar-39Ar 同位素年代学特征[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 207–222.
- GAO Yongbao, WU Huanhuan, LI Wenyuan, et al. Tourmaline Mineralogy, 40Ar-39Ar Dating and Implications for the 509 Daobanxi Lithium Deposit in Xinjiang Province[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(4): 207–222.
- 葛战林, 郑艳荣, 郝迪, 等. 东秦岭杨斜-丰北河成矿带杨屋场钨(金)矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2020, 53(3): 140–152.
- GE Zhanlin, ZHENG Yanrong, HAO Di, et al. On the Geological Characteristics and Genesis of Yangwuchang Tungsten (Gold) Deposit in the Yangxie-Fengbeihe Metallogenic Belt, East Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(3): 140–152.
- 栾燕, 孙晓辉, 刘民武, 等. 磁铁矿 LA-ICP-MS 原位微量元素分析方法研究[J]. 地质科技通报, 2021, 40(2): 167–175.
- LUAN Yan, SUN Xiaohui, LIU Minwu, et al. Analysis method for in-situ trace element determination of magnetite by LA-ICP-MS[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(2): 167–175.
- 王汉辉, 唐利, 杨勃畅, 等. 东秦岭黄水庵碳酸岩型 Mo-REE 矿床方解石地球化学特征和氟碳铈矿 U-Th-Pb 年龄及其意义[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 48–62.
- WANG Hanhui, TANG Li, YANG Bochang, et al. Geochemical Characteristics of Calcite and Bastnäsite U-Th-Pb Age of the Huangshui'an Carbonatite-hosted Mo-REE Deposit, Eastern Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 48–62.
- 王梦玺, 郭腾龙, 凤永刚, 等. 东秦岭构造带古生代花岗岩与赋矿花岗伟晶岩的成因联系[J]. 矿床地质, 2022, 41(6): 1124–1151.
- WANG Mengxi, GUO Tenglong, FENG Yonggang, et al. Genetic link of Paleozoic granites and mineralized granitic pegmatites in East Qinling tectonic belt[J]. *Mineral Deposits*, 2022, 41(6): 1124–1151.
- 王利波, 王威, 姚宗全, 等. 新疆和田县 509 道班西锂铍稀有金属矿床石榴子石特征及其岩浆演化意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 223–233.
- WANG Libo, WANG Wei, YAO Zongquan, et al. Characteristics of Garnet in the 509 Daobanxi Lithium Beryllium Rare Metal Deposits in Hotan County, Xinjiang and Indicative Significance of Magmatic Evolution[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(4): 223–233.
- 周起凤, 秦克章, 朱丽群, 等. 花岗伟晶岩成因探讨: 岩浆分异与深熔[J]. 地学前缘, 2023, 30(5): 26–39.
- ZHOU Qifeng, QIN Kezhang, ZHU Liqun, et al. Overview of magmatic differentiation and anatexis: Insights into pegmatite genesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(5): 26–39.
- Badanina E, Veksler I, Thomas R, et al. Magmatic evolution of Li-F, rare-metal granites: a case study of melt inclusions in the Khangilay complex, Eastern Transbaikalia (Russia)[J]. *Chemical Geology*, 2004, 210: 113–133.
- Bai Y, Shen P, Cao C, et al. In-situ elemental and boron isotopic variations of tourmaline from the Koktokay pegmatitic rare-metal deposit, China: Insights into external contamination and the source of the granitic pegmatite[J]. *Ore Geology Review*, 2023, 162, 105683.
- Bosi F, Naitza S, Skogby H, et al. Late magmatic controls on the origin of schorlitic and foititic tourmalines from late- Variscan peraluminous granites of the Arbus pluton (SW Sardinia, Italy). Crystal- chemical study and petrological constraints[J]. *Lithos*, 2018, 308–309, 395–411.
- Bosi F, Naitza S, Secchi F, et al. Petrogenetic controls on the origin of tourmalinite veins from Mandrolisai igneous massif (Central Sardinia, Italy): Insights from tourmaline crystal chemistry[J]. *Lithos*, 2019, 342–343: 333–344.
- Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 213–237.
- Dong Y P, Zhou M F, Zhang G W, et al. The Grenvillian Songshugou ophiolite in the Qinling Mountains, Central China: implications for the tectonic evolution of the Qinling orogenic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 325–335.
- Drivenes K, Larsen R B, Müller A, et al. 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*, 2015, 169: 1–27.
- Duchoslav M, Marks M A W, Drost K, et al. Changes in tourmaline composition during magmatic and hydrothermal processes leading to tin-ore deposition: the Cornubian Batholith, SW England[J]. *Ore Geology Review*, 2017, 83: 215–234.
- Harlaux M, Kouzmanov K, Gialli S, et al. Tourmaline as a tracer of late-magmatic to hydrothermal fluid evolution: the world-class San Rafael tin(-copper) deposit, Peru[J]. *Economic Geology*, 2020, 115: 1665–1697.
- Henry D J, Guidotti C V. Tourmaline as a petrogenetic indicator min-

- eral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine[J]. *American Mineralogist*, 1985, 70: 1–15.
- Henry D J, Novák M, Hawthorne F C, et al. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals[J]. *American Mineralogist*, 2011, 96: 895–913.
- Ji M, Gao X Y, Chen Y X, et al. Boron isotope behavior during metamorphic dehydration and partial melting of continental crust: Constraints from tourmaline in metapelites and leucocratic dikes, Himalayan orogen[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, 362: 1–21.
- Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 34–43.
- Liu T, Jiang S Y, Su H M, et al. Tourmaline as a tracer of magmatic-hydrothermal evolution and potential Nb-Ta-(W-Sn) mineralization from the Lingshan granite batholiths, Jiangxi province, southeast China[J]. *Lithos*, 2023, 438–439, 107016.
- London D, Morgan G B, Wolf M B. Boron in granitic rocks and their contact aureoles[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1996, 33: 299–330.
- Perugini D, Poli G. Tourmaline nodules from Capo Bianco aplite (Elba Island, Italy): an example of diffusion limited aggregation growth in a magmatic system[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 153: 493–508.
- Qin Z W, Wu Y B, Wang H, et al. Geochronology, geochemistry, and isotope compositions of Piaochi S-type granitic intrusion in the Qinling orogen, central China: petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 2014, 202–203, 347–362.
- Qiu K F, Yu H C, Hetherington C, et al. Tourmaline composition and boron isotope signature as a tracer of magmatic hydrothermal processes[J]. *American Mineralogist*, 2021, 106: 1033–1044.
- Rozendaal A, Bruwer L. Tourmaline nodules: indicators of hydrothermal alteration and Sn-Zn-(W) mineralization in the Cape Granite Suite, South Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1995, (1): 141–155.
- van Hinsberg V J. Preliminary experimental data on trace element partitioning between tourmaline and silicate melt[J]. *Canadian Mineralogist*, 2011b, 49: 153–163.
- van Hinsberg V J, Henry D J, Marschall H R. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment[J]. *Canadian Mineralogist*, 2011a, 49: 1–16.
- Wu Y B, Zheng Y F. Tectonic evolution of a composite collision orogen: an over view on the Qinling–Tongbai–Hong'an–Dabie–Sulu orogenic belt in central China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1402–1428.
- Xie L, Tao X Y, Wang R C, et al. Highly fractionated leucogranites in the eastern Himalayan Cuonadong dome and related magmatic Be–Nb–Ta and hydrothermal Be–W–Sn mineralization[J]. *Lithos*, 2020, 354–355, 105286.
- Yang S Y, Jiang S Y, Zhao K D, et al. Tourmaline as a recorder of magmatic-hydro-thermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2015, 170: 1–21.
- Yu D, Yan H, Wang S, et al. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the pegmatite in Ke'eryin rare metal orefield, Eastern Tibet: Implications for pegmatitic evolution[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2024, 262: 107475.
- Zhao H D, Zhao K D, Palmer M R, et al. In-situ elemental and boron isotopic variations of tourmaline from the Sanfang granite, South China: insights into magmatic-hydrothermal evolution [J]. *Chemical Geology*, 2019, 504: 190–204.
- Zhao Z, Yang X Y, Liu Q Y, et al. In-situ boron isotopic and geochemical compositions of tourmaline from the Shangbao Nb–Ta bearing monzogranite, Nanling Range: Implication for magmatic-hydrothermal evolution of Nb and Ta[J]. *Lithos*, 2021, 386–387, 106010.
- Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M. Mineralogy of columbite-group minerals from the rare-element pegmatite dykes in the East-Qinling orogen, central China: Implications for formation times and ore genesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 218: 104879.