

西藏达局地区电气石脉地球化学特征及找矿指示意义

李庆功¹, 次琼^{2*}, 吴松¹, 庞北¹, 郑有业¹

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 西藏自治区地质矿产勘查开发局, 西藏 拉萨 850003



摘要:达局地区位于西藏日喀则市昂仁县境内,朱诺超大型斑岩铜矿床东南约30 km处。达局花岗岩中发育大量的电气石脉,宽窄不一,最宽处可达1 m。为查明电气石脉成因、地球化学特征及找矿指示标志,开展了电子探针和LA-ICP-MS分析工作。根据镜下观察和形态特征,可将达局地区电气石划分为扇状电气石、柱状电气石和细粒状电气石3种类型。所有类型电气石属碱基亚类镁电气石—黑电气石固溶体系列,元素的主要替换机制为 $\text{Fe}^{3+}\text{Al}_1$ 和 $(\text{NaMg})(\text{X}\square\text{Al})_1$ 。3种类型电气石具有高Mg含量(1.18~1.74 apfu)、Sr含量(589×10^{-6} ~ $1\ 943\times 10^{-6}$)、V含量(154×10^{-6} ~ 371×10^{-6})以及Y位基本无Al阳离子特征,表明其为热液成因。微量元素含量特征表明,达局地区电气石具有高的Sr/Y比值、Ba、Rb、Ni含量和低的Li含量,指示达局地区具有形成斑岩型铜矿床的潜力,值得进一步开展勘查工作。

关键词:电气石脉;地球化学特征;成因类型;找矿指示;达局;西藏

中图分类号:P618.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-0967-17 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.056
引用格式:李庆功,次琼,吴松,等.西藏达局地区电气石脉地球化学特征及找矿指示意义[J].黄金科学技术,2025,33(5):967-983.LI Qinggong, CI Qiong, WU Song, et al. Geochemical Characteristics and Prospecting Significance of Tourmaline Veins in Daju Area, Tibet[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(5): 967-983.

电气石是一种常见且稳定的富硼硅酸盐矿物,广泛分布于花岗岩相关的岩浆—热液型矿床中(Henry et al, 1996; Slack et al, 2011)。电气石的化学成分和晶体结构较为复杂,一般化学通式为 $\text{XY}_3\text{Z}_6[\text{T}_6\text{O}_{18}][\text{BO}_3]_3\text{V}_3\text{W}$,其中 $\text{X}=\text{Na}, \text{Ca}, \text{K}$, 空位; $\text{Y}=\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Al}, \text{Li}$; $\text{Z}=\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Cr}, \text{V}$; $\text{W}=\text{O}, \text{OH}, \text{F}, \text{Cl}$ (Rosenberg et al, 1979; Henry et al, 1996; Jiang, 1998; Hawthorne et al, 1999)。电气石具有稳定的物理化学性质和极低的元素扩散速率,一旦结晶,便能够稳定存在于极宽范围的温度(150~900 °C)和压力(6~6 000 MPa)条件下,并且在大多数地表条件下电气石与流体不发生反应(Henry et al, 2011; Van Hinsberg et al, 2011),因此能够完整地记录岩

石形成条件和源区特征等信息。研究表明,W-Sn多金属和稀有金属有关的花岗岩矿床,多与黑电气石密切相关;而块状硫化物矿床中多为镁电气石—黑电气石固溶体系列(毛景文等,1993)。电气石具有复杂多变的化学成分、晶体结构以及宽泛的硼同位素值,常被用来示踪流体来源、岩浆热液演化和成矿过程等(Yang et al, 2015a, 2015b; Zhao et al, 2019; Hu et al, 2020; Codeço et al, 2021; Zhao et al, 2021; Guo et al, 2022; Liu et al, 2023; Zhao et al, 2024; Zheng et al, 2024)。戴加祺等(2018)对相山铀矿床中电气石的化学成分和硼同位素组成进行研究,查明了相山火山侵入杂岩体的来源,提出电气石形成于高氧逸度环境中,这有利于U元素的迁

收稿日期:2025-01-15;修订日期:2025-06-12

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目“西藏冈底斯斑岩铜矿成矿规律及资源潜力评价”(编号:XZ202401YD0006)和深地国家科技重大专项(课题)“冈底斯中段斑岩型铜多金属矿床高效勘查技术方法集成及找矿靶区优选评价”(编号:2024ZD1003203)联合资助

作者简介:李庆功(2001—),男,山东临沂人,硕士研究生,从事矿床地球化学研究工作。E-mail:qinggongli@email.cugb.edu.cn

*通信作者:次琼(1972—),男,西藏日喀则人,高级工程师,从事矿产地质调查研究工作。E-mail:346755881@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

移与富集,为区域成岩成矿过程的物质来源及演化提供了指示。近年来,随着原位微区技术的发展,电气石的化学组分和硼同位素组成常作为一种重要的指标,用于区分不同矿床类型、形成环境以及指导找矿勘查(Van Hinsberg et al, 2011; Guo et al, 2021; Sciuba et al, 2021; Zhao et al, 2021; Beckett-Brown et al, 2023a, 2024; Liu et al, 2023; Yao et al, 2024; Zhao et al, 2024)。Sciuba et al(2021)对18个造山型金矿中电气石的化学组分和硼同位素组成进行了研究,提出高的Sr、V和Ni含量,低的Li、Be、Ga、Sn、Nb、Ta、U和Th含量,能够用来区分造山型金矿有关的电气石与其他矿床类型和地质环境中的电气石。此外,Beckett-Brown et al(2024)对加拿大地区Casino斑岩铜金钼矿床电气石的形态结构和化学组分进行了细致研究,提出Li、Zn、Ga、Sr、V和Pb等微量元素可用于区分不同的成矿类型,并指导矿产勘查。

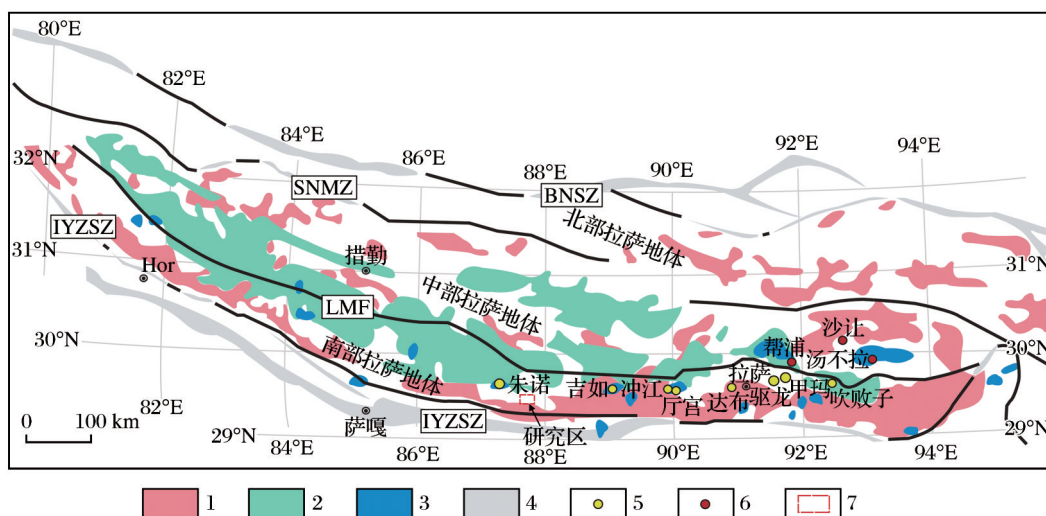
在西藏地区,喜马拉雅成矿带淡色花岗岩中发育有大量电气石,一直是研究的重点。前人对该区内电气石的岩相学、地球化学和硼同位素组成开展了系统研究,认为区内电气石多属于岩浆成因,电气石的微量元素变化能够反映结晶分异演化程度,Li、Be、Nb和Ta等稀有金属元素的富集程度能够指示区内成矿潜力(Zhou et al, 2019; Xie et al, 2023a, 2023b)。综合已有研究来看,前人对电气石的研究多集中在花岗岩和伟晶岩相关的矿床中,而对斑岩型矿床中电气石的研究相对较少。Zheng et al(2024)对冈底斯铜多金属成矿带西段朱诺—北姆朗矿床中新发现的电气石开展了研究,基于多期次电气石的组分变化认为岩浆热液系统中氧化成矿热液与斑岩体之间的水—岩反应是铜沉淀的关键,并提出了闪长质岩浆补给模型,用来解释富矿斑岩系统的形成,这为理解碰撞型斑岩铜矿及电气石的形成提供了重要参考。在最新的野外地质调查中,发现在距离朱诺—北姆朗矿床东南约30 km的达局地区,也发育有大量电气石脉。由于研究区工作程度较低,地质特征和矿床类型尚不明确,为此采集达局电气石样品进行岩相学观察、电子探针和LA-ICP-MS分析,探讨了该区内电气石成因、矿床类型和成矿潜力等问题,以期为区域内下一步找矿勘查提供理论依据。

1 区域地质概况

达局地区位于西藏冈底斯铜多金属成矿带西段朱诺矿集区内,产于南部拉萨地体的火山—岩浆岩中(图1)。拉萨地体是青藏高原中生代以来岩浆活动最频繁、规模最大且岩浆类型最复杂的一个构造—岩浆岩带(李廷栋,2002),被狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带(SNMZ)和洛巴堆—米拉山断裂(LMF)划分为北部拉萨地体、中部拉萨地体和南部拉萨地体(朱弟成等,2012)。冈底斯岩基(Wen, 2007; Ji et al., 2009, 2012)和林子宗群火山岩在区内分布较广(Mo et al, 2007, 2008; Lee et al, 2012),而少量渐新世—中新世高Sr/Y花岗质侵入体以岩株形式产出(Chung et al, 2003, 2009; Zheng et al, 2012a, 2012b; 孙祥等, 2013)。冈底斯斑岩铜成矿带自西向东发育有朱诺、吉如、冲江、厅宫、达布、驱龙和甲玛等斑岩型矿床,成岩成矿时代集中在20~13 Ma(Hou et al, 2009; Zheng et al, 2015)。

达局地区出露地层主要为下白垩统比马组、下白垩—上白垩统昂仁组和楚木龙组、始新统秋乌组以及第四系(图2)。比马组主要分布于研究区北部,岩性包括凝灰岩、结晶灰岩和层状砂岩等(杨宗耀等,2019)。下白垩—上白垩统昂仁组和楚木龙组分别出露于研究区西南部和东北部,前者出露面积相对广泛,呈EW向展布,岩性包括粗砂岩、页岩、细粒砂岩和粉砂岩等;后者出露较少,以石英砂岩和粉砂岩等岩性组合为特征(Song et al, 2018)。始新统秋乌组分布于研究区西南部,呈EW向展布,主要岩性为一套含煤碎屑岩(Zhang et al, 2017)。第四系出露较少,多为冲洪积和残坡积物等。

达局地区构造十分发育,多为断裂,按其走向和力学性质可划分为近EW、NE和NW向断裂,其中以近EW向断裂和NE向断裂最为发育(图2)。近EW向断裂分布于研究区中部和南部,倾角较缓。NE向断裂发育于研究区西部,为一系列高角度正断层(侯增谦等,2006)。NW向断裂主要分布于研究区西北部和中南部,其断裂面倾角大多为中—陡倾角度。根据断裂的相互切割关系,其生成顺序依次为近EW向→NE向→NW向断裂。伴随复杂的构造演化,区内发育多期岩浆侵入和火山喷发作用,侵入时代包括古新世、始新世和中新世。研



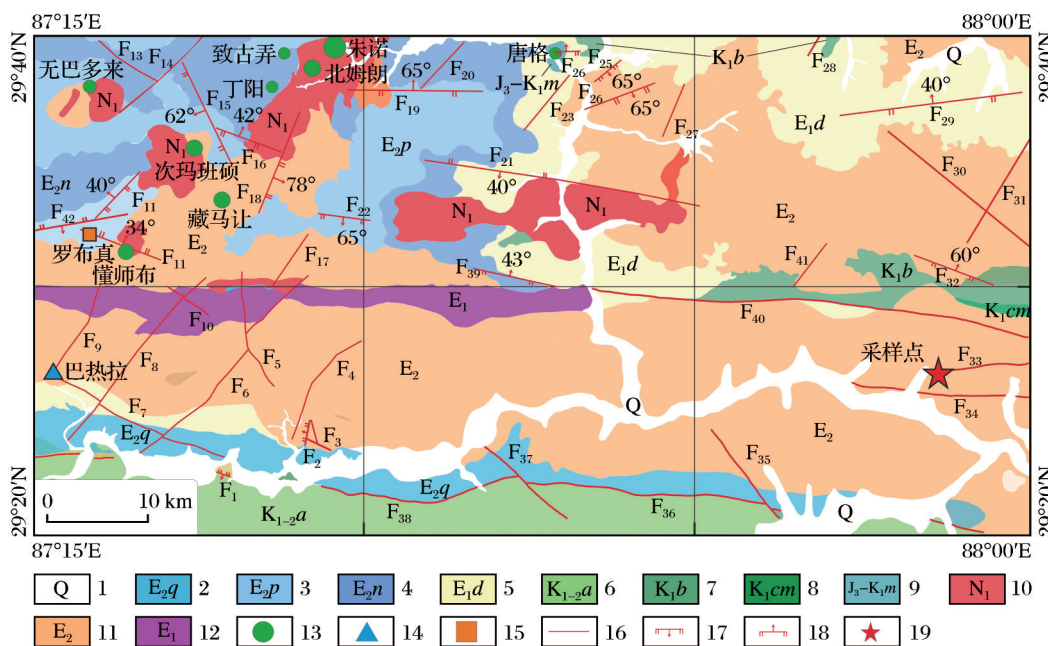
BNSZ-班公湖—怒江缝合带;SNMZ-狮泉河—纳木错—嘉黎缝合带;LYZSZ-雅鲁藏布江缝合带;LMF-洛巴堆—米拉山断裂带;
1.冈底斯岩基;2.林子宗火山岩;3.渐新世—中新世花岗岩;4.蛇绿混杂岩带;5.Cu-Mo矿床;6.Mo-Cu/Mo矿床;7.研究区

图1 冈底斯带区域地质图及主要斑岩型铜矿床分布(修改自Wu et al,2016;郑有业等,2021)

Fig. 1 Regional geological map of Gangdise belt and distribution of main porphyry copper deposits (modified after Wu et al,2016;Zheng et al,2021)

究区广泛出露始新世花岗岩,以岩基形式产出,总体呈EW向展布。岩石类型有(黑云)二长花岗岩、含黑云角闪二长花岗岩、钾长花岗岩、黑云花岗闪

长岩和花岗(二长)闪长岩等。古新世和中新世花岗岩出露于研究区西北部,多以岩株或岩脉形式产出。火山岩以火山碎屑岩为主,赋存在桑日群和林



1.第四系;2.秋乌组;3.帕那组;4.年波组;5.典中组;6.昂仁组;7.比马组;8.楚木龙组;9.麻木下组;10.中新世花岗岩;11.始新世花岗岩;
12.古新世花岗岩;13.铜多金属矿;14.铅锌矿;15.金银多金属矿;16.断层;17.正断层;18.逆断层;19.采样点

图2 西藏朱诺矿集区地质简图

Fig. 2 Geological map of Zhunuo ore concentration area in Xizang

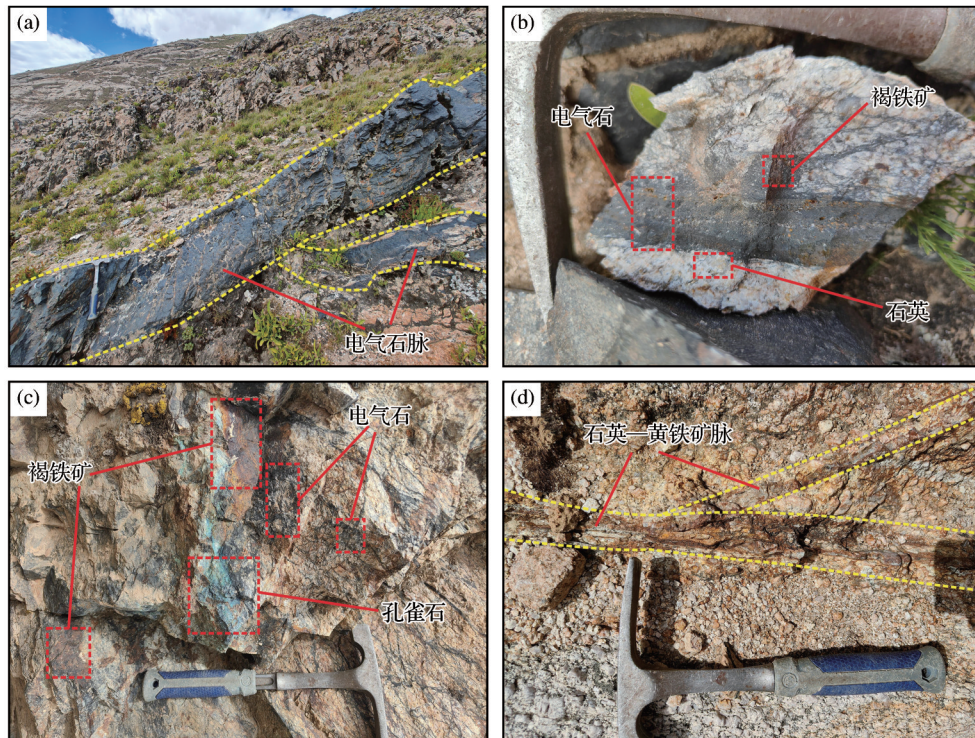
子宗群中,并以林子宗群火山岩为主体(付文春等, 2014)。

2 样品及分析方法

2.1 样品描述

研究区内电气石脉十分发育,颜色为黑色,产状为 $9^{\circ}\angle 45^{\circ}$,呈SN向延伸,穿插到围岩中,宽度变化范围较大,细处为1~3 cm,最宽处可达1 m[图3(a)、3(b)]。区域内主要岩性为二长花岗岩,岩石风化

面为土黄色,新鲜面呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,主要造岩矿物为斜长石(35%~40%)、钾长石(30%~35%)、石英(约20%)、少量黑云母(约5%)和角闪石(约5%)。围岩蚀变较为发育,绢英岩化主要表现为斜长石蚀变为石英和细粒绢云母,褐铁矿化多以石英—褐铁矿脉或裂隙面形式产出,孔雀石化多产于岩石裂隙面[图3(c)、3(d)]。本次试验分析样品均采自达局地区出露岩石中,采样坐标为E87°51'55",N29°26'25"。



(a)黑色电气石巨脉,产状 $9^{\circ}\angle 45^{\circ}$; (b)二长花岗岩中石英—电气石—褐铁矿脉;
(c)围岩裂隙面孔雀石化和褐铁矿化; (d)围岩中石英—黄铁矿脉

图3 西藏达局地区电气石脉野外特征

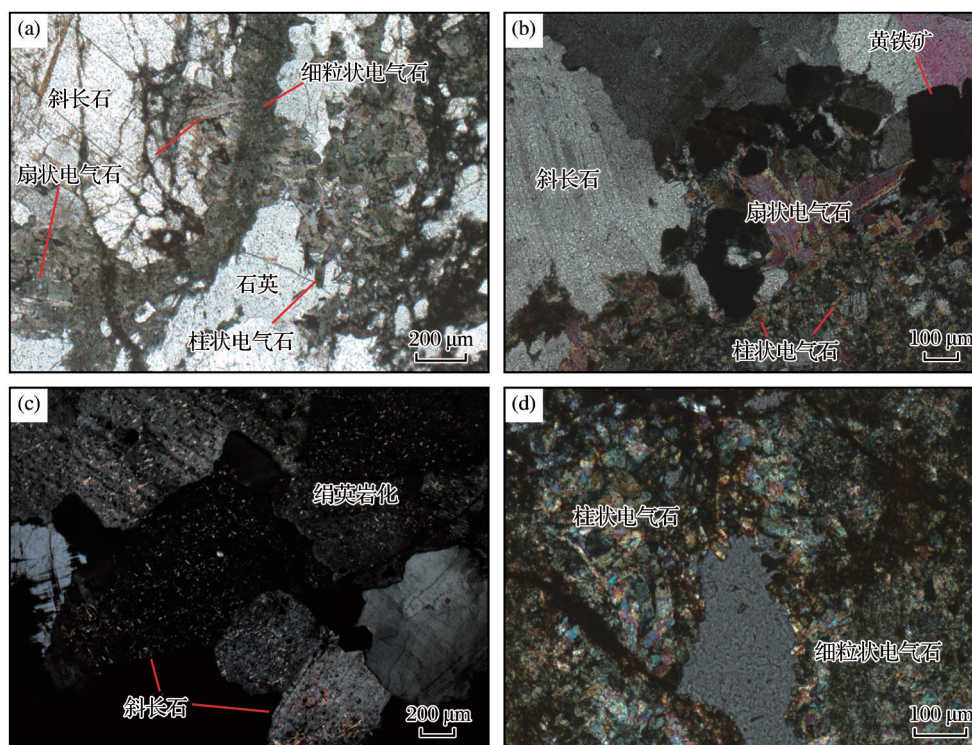
Fig. 3 Field characteristics of tourmaline veins in Daju area, Xizang

通过镜下观察可知,电气石多呈脉状分布。根据不同形态特征[图4(a)、4(b)],将电气石划分为扇状(Tur-I)、柱状(Tur-II)和细粒状(Tur-III)3类。扇状电气石呈半自形—自形,颗粒较大,具有黄褐—蓝绿色的多色性,无明显环带,多发育在细粒状电气石脉边部。柱状电气石常呈短柱状分布在脉体中,晶形较好,呈半自形—自形,横截面为三角形或多边形,具有黄—绿色的多色性,部分柱状电气石充填在石英和长石空隙间。细粒状电气石

常呈他形粒状分布在脉体中,基本无晶形,具有橙黄—绿色的多色性。围岩中绢云母化表现为长石蚀变为长针状、鳞片状的云母[图4(c)]。电气石多以脉状形式充填在石英和斜长石等矿物之间[图4(d)],局部与斜长石发生交代溶蚀作用,致使矿物边界模糊不清,表明电气石形成于晚期岩浆热液流体中。

2.2 分析方法

在中国地质科学院地质研究所电子探针实验



(a)单偏光下扇状、柱状和细粒状电气石;(b)正交偏光下扇状和柱状电气石;
(c)针状和鳞片状绢云母化蚀变;(d)正交偏光下柱状和细粒状电气石

图4 西藏达局地区电气石脉镜下照片

Fig. 4 Microscopic photos of tourmaline veins in Daju area, Xizang

室完成了电气石主微量元素测试。测试仪器采用 JEOL JXA-8100a 型电子探针仪,使用条件:加速电压为 15 kV,束流为 20 nA,束斑直径为 5 μm 。主量元素峰值测定时间为 10~20 s,背景测定时间为其 0.5 倍。中国国家标准样品 GSB 与美国 SPI 矿物作为标样。所有测试数据均已进行 ZAF 校正。

原位微量元素测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,采用 LA-ICP MS 分析,LA 为美国 Coherent 公司制造的 GeoLasPro193nm 准分子型全自动激光剥蚀进样系统,ICPMS 为 Agilent7900 的质谱仪。本测试中,束斑直径为 60 μm ,频率为 5 Hz,能量密度约为 5 J/cm²。用 T 形接头将剥蚀气溶胶与氦气、氩气混合,以氦气作为运载气体将样品剥蚀颗粒送入质谱仪中。样品数据采集周期为 20 s 背景信号和 50 s 样品信号。所选标样和计算方法具体参考 Pearce et al(1997)和 Liu et al(2008)。本次分析测试了 41 种微量元素,大多数元素检测限低于 1×10^{-6} ,少数为 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ 。原始数据的离线处

理采用 ICPMSDataCal 软件完成(Liu et al,2008)。

3 分析结果

3.1 主量元素

达局地区电气石主量元素分析结果见表 1。基于 Henry et al(1996)提出的电气石分子式 $\text{XY}_3\text{Z}_6[\text{T}_6\text{O}_{18}][\text{BO}_3]_3\text{V}_3\text{W}$ ($\text{X}=\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{K}^+$, 空位; $\text{Y}=\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{Li}^+, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti}^{4+}$; $\text{Z}=\text{Al}^{3+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$; $\text{T}=\text{Si}^{4+}, \text{Al}^{3+}, \text{B}^{3+}$; $\text{V}=\text{OH}^-, \text{O}^{2-}$; $\text{W}=\text{OH}^-, \text{O}^{2-}, \text{F}^-, \text{Cl}^-$),以 31 个阴离子(O、OH、F)为基础进行计算, B_2O_3^* 与 H_2O^* 含量分别基于 $\text{B}=3$ 和 $\text{OH}+\text{F}=4$ 计算获得(Henry et al,1996),结果见表 2。

达局地区不同产状电气石主量元素成分差异不大, SiO_2 (含量为 35.00%~35.97%,平均值为 35.37%)、 Al_2O_3 (含量为 27.99%~31.47%,平均值为 29.70%)、 FeO (含量为 9.05%~12.70%,平均值为 10.50%)、 MgO (含量为 6.23%~7.55%,平均值为 6.77%) 和 Na_2O (含量为 2.14%~2.63%,平均值为

表1 西藏达局地区电气石主量元素分析结果

Table 1 Analysis results of main elements of tourmaline in Daju area, Xizang (%)

类型	样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	F
Tur-I	Tur1-3-2	35.01	0.89	28.79	0.03	11.03	6.72	0.36	0.01	2.36	0.03	0.17
	Tur1-3-3	35.25	0.16	28.78	-	11.14	7.31	0.12	0.01	2.22	0.03	-
	Tur2-6-1	35.21	0.23	29.86	-	10.72	6.53	0.23	0.00	2.43	0.05	0.09
	Tur2-6-2	35.37	0.34	29.75	-	10.63	6.50	0.25	0.03	2.37	0.07	0.02
	Tur2-6-3	35.60	0.20	29.55	-	10.72	6.91	0.21	0.01	2.45	0.08	0.05
Tur-II	Tur1-3-4	35.46	0.20	30.51	0.01	9.82	6.44	0.17	-	2.34	0.06	0.04
	Tur1-3-5	35.30	0.29	30.42	0.03	10.26	6.24	0.19	0.03	2.44	0.06	0.01
	Tur1-3-7	35.23	0.81	29.21	0.14	11.00	6.53	0.26	0.05	2.42	0.02	0.22
	Tur1-3-11	35.72	0.24	31.47	0.01	9.05	6.53	0.22	-	2.43	0.05	0.08
	Tur2-3-1	35.70	0.10	30.38	0.04	10.33	6.66	0.18	0.05	2.63	0.06	0.01
	Tur2-3-2	35.60	0.14	31.01	0.11	9.74	6.78	0.21	0.03	2.60	0.06	0.05
	Tur2-3-3	35.24	0.21	30.10	-	10.02	6.72	0.20	0.02	2.51	0.06	0.05
	Tur2-3-4	35.10	0.20	29.51	0.00	10.70	6.57	0.14	0.04	2.50	0.12	0.03
	Tur2-3-5	35.40	1.17	28.39	0.01	11.30	6.49	0.32	-	2.30	0.08	0.15
	Tur2-3-6	35.43	0.16	30.13	0.03	9.82	6.99	0.19	0.04	2.53	0.05	0.02
	Tur2-3-7	35.35	0.31	29.87	-	11.03	6.66	0.20	0.04	2.48	0.06	0.06
	Tur2-3-8	35.31	0.25	28.11	0.01	11.35	7.41	0.10	0.04	2.40	0.06	0.01
	Tur2-3-9	35.12	0.25	28.13	-	11.60	7.22	0.08	0.04	2.53	0.02	0.00
	Tur-III	Tur1-3-1	35.38	0.56	29.53	0.02	11.04	6.24	0.20	-	2.36	0.07
Tur1-3-12		35.04	0.09	30.78	0.02	9.34	6.95	0.19	0.02	2.42	0.04	-
Tur2-4-1		35.39	0.86	29.44	-	10.87	6.64	0.32	0.03	2.30	0.03	0.12
Tur2-4-2		35.97	0.72	29.44	-	10.50	6.63	0.32	0.04	2.22	0.04	0.05
Tur2-4-3		35.48	1.17	27.99	-	12.17	6.23	0.39	0.06	2.14	0.03	0.13
Tur2-4-4		35.31	0.20	29.58	0.01	10.52	7.14	0.16	0.07	2.27	0.02	-
Tur2-6-4		35.30	0.16	28.84	-	11.41	7.12	0.15	0.03	2.34	0.02	0.02
Tur2-6-6		35.45	0.18	29.05	0.00	10.27	7.55	0.12	0.07	2.39	0.04	0.02

注：“-”代表低于检出限

2.39%)含量较高且变化不大, TiO₂ (含量为 0.09%~1.17%, 平均值为 0.35%)、CaO (含量为 0.08%~0.39%, 平均值为 0.20%) 和 K₂O (含量为 0.02%~0.12%, 平均值为 0.05%) 含量低且变化大, 部分样品 MnO 和 F 含量低于检出限。根据 Henry et al (2011) 提出的 X 位置上阳离子占位情况, 达局地区不同产状电气石均落入碱族电气石区域范围内 [图 5(a)]。在 Henry et al (1985) 提出的 Al-Fe-Mg 三元图解中, 3 种产状的电气石样品基本落入区域 6 (富 Fe³⁺ 石英—电气石岩、钙硅酸盐和变质沉积岩), 仅 Tur-II 电气石中一个样品点落入区域 5 (不含 Al 饱和矿物的变质泥质岩和变质砂屑岩), 表明 3 种产状的电气石均形成于更氧化的环境中 [图 5(b)]。在 Mg/(Mg+Fe) -^x □/(^x □ + Na+K) 和 Mg/(Mg+Fe)

-Na/(Na+Ca) 分类图解中, Tur-I 电气石基本投在镁电气石区域, 仅一个投入黑电气石区域; Tur-II 和 Tur-III 电气石均投入黑电气石和镁电气石区域, 表明所有测试的电气石均属于黑电气石—镁电气石类质同象系列 [图 5(c)、5(d)]。综上所述, 达局地区电气石属碱性电气石中的黑电气石—镁电气石固溶体系列。在 Al-Fe 和 Mg-Fe 图解中, 达局地区电气石替代方式为 Fe³⁺Al₁ [图 6(a)、6(b)]; 而在 Mg-Ca 和 Na-^x □ 图解中, 达局地区电气石表现出 (NaMg)(^x □)₁ 的替代方式 [图 6(c)、6(d)]。

3.2 微量元素

达局地区电气石微量元素测试分析结果见表 3。达局电气石大多数微量元素具有较大的变化范围, 如: Ni (21.2×10⁻⁶~187.0×10⁻⁶)、Pb (12.8×10⁻⁶~144.0×

表2 西藏达局地区电气石结构式各位置离子数特征

Table 2 Characteristics of the number of ions in each position of tourmaline structure in Daju area, Xizang (apfu)

样品编号	T-site			Z-site			Y-site						X-site			X_V ac	OH+ F	B ₂ O ₃ *	H ₂ O*
	Si ⁴⁺	Al ³⁺	总和	Al ³⁺	Mg ²⁺	总和	Al ³⁺	Ti ⁴⁺	Fe ²⁺	Mg ²⁺	Mn ²⁺	总和	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺				
Tur1-3-2	5.95	0.05	6.00	5.71	0.29	6.00	0.00	0.11	1.57	1.41	0.00	3.09	0.06	0.78	0.01	0.15	4	10.23	3.45
Tur1-3-3	5.99	0.01	6.00	5.76	0.24	6.00	0.00	0.02	1.58	1.61	0.00	3.21	0.02	0.73	0.01	0.24	4	10.23	3.53
Tur2-6-1	5.95	0.05	6.00	5.90	0.10	6.00	0.00	0.03	1.52	1.55	0.00	3.10	0.04	0.80	0.01	0.15	4	10.28	3.50
Tur2-6-2	5.97	0.03	6.00	5.90	0.10	6.00	0.00	0.04	1.50	1.53	0.00	3.08	0.04	0.78	0.01	0.16	4	10.29	3.54
Tur2-6-3	5.99	0.01	6.00	5.84	0.16	6.00	0.00	0.03	1.51	1.58	0.00	3.11	0.04	0.80	0.02	0.15	4	10.33	3.54
Tur1-3-4	5.97	0.03	6.00	6.00	0.00	6.00	0.03	0.02	1.38	1.62	0.00	3.05	0.03	0.76	0.01	0.19	4	10.32	3.54
Tur1-3-5	5.95	0.05	6.00	5.99	0.01	6.00	0.00	0.04	1.45	1.56	0.00	3.05	0.03	0.80	0.01	0.16	4	10.31	3.55
Tur1-3-7	5.95	0.05	6.00	5.76	0.24	6.00	0.00	0.10	1.55	1.41	0.01	3.07	0.05	0.79	0.00	0.16	4	10.29	3.45
Tur1-3-11	5.94	0.06	6.00	6.00	0.00	6.00	0.10	0.03	1.26	1.62	0.00	3.01	0.04	0.78	0.01	0.17	4	10.45	3.57
Tur2-3-1	5.96	0.04	6.00	5.94	0.06	6.00	0.00	0.01	1.44	1.60	0.01	3.06	0.03	0.85	0.01	0.10	4	10.41	3.58
Tur2-3-2	5.92	0.08	6.00	5.99	0.01	6.00	0.00	0.02	1.35	1.67	0.00	3.04	0.04	0.84	0.01	0.11	4	10.46	3.58
Tur2-3-3	5.95	0.05	6.00	5.94	0.06	6.00	0.00	0.03	1.41	1.63	0.00	3.08	0.04	0.82	0.01	0.13	4	10.29	3.53
Tur2-3-4	5.97	0.03	6.00	5.88	0.12	6.00	0.00	0.03	1.52	1.55	0.01	3.10	0.03	0.82	0.03	0.12	4	10.22	3.51
Tur2-3-5	6.00	0.00	6.00	5.67	0.33	6.00	0.00	0.15	1.60	1.31	0.00	3.06	0.06	0.75	0.02	0.17	4	10.25	3.47
Tur2-3-6	5.96	0.04	6.00	5.92	0.08	6.00	0.00	0.02	1.38	1.68	0.01	3.08	0.03	0.82	0.01	0.13	4	10.34	3.56
Tur2-3-7	5.94	0.06	6.00	5.86	0.14	6.00	0.00	0.04	1.55	1.52	0.01	3.12	0.04	0.81	0.01	0.14	4	10.34	3.54
Tur2-3-8	6.02	0.00	6.02	5.65	0.35	6.00	0.00	0.03	1.62	1.53	0.01	3.18	0.02	0.79	0.01	0.18	4	10.19	3.51
Tur2-3-9	6.00	0.00	6.00	5.66	0.34	6.00	0.00	0.03	1.66	1.50	0.01	3.20	0.01	0.84	0.00	0.14	4	10.17	3.51
Tur1-3-1	5.98	0.02	6.00	5.87	0.13	6.00	0.00	0.07	1.56	1.44	0.00	3.07	0.04	0.77	0.02	0.17	4	10.28	3.51
Tur1-3-12	5.90	0.10	6.00	6.00	0.00	6.00	0.02	0.01	1.32	1.74	0.00	3.09	0.03	0.79	0.01	0.16	4	10.32	3.56
Tur2-4-1	5.95	0.05	6.00	5.78	0.22	6.00	0.00	0.11	1.53	1.45	0.00	3.09	0.06	0.75	0.01	0.19	4	10.34	3.51
Tur2-4-2	6.03	0.00	6.03	5.81	0.19	6.00	0.00	0.09	1.47	1.47	0.00	3.03	0.06	0.72	0.01	0.22	4	10.38	3.56
Tur2-4-3	6.03	0.00	6.03	5.60	0.40	6.00	0.00	0.15	1.73	1.18	0.01	3.07	0.07	0.71	0.01	0.22	4	10.23	3.47
Tur2-4-4	5.96	0.04	6.00	5.85	0.15	6.00	0.00	0.03	1.49	1.64	0.01	3.16	0.03	0.74	0.00	0.22	4	10.29	3.55
Tur2-6-4	5.99	0.01	6.00	5.75	0.25	6.00	0.00	0.02	1.62	1.55	0.00	3.20	0.03	0.77	0.00	0.20	4	10.25	3.52
Tur2-6-6	5.99	0.01	6.00	5.78	0.22	6.00	0.00	0.02	1.45	1.69	0.01	3.17	0.02	0.78	0.01	0.19	4	10.28	3.54

注:表中X、Y、Z和T为电气石分子式中不同位置上所占离子数情况;结构式基于31个阴离子(O, OH, F)计算;B₂O₃*和H₂O*按化学计量计算, B=3 apfu, OH+F=4 apfu

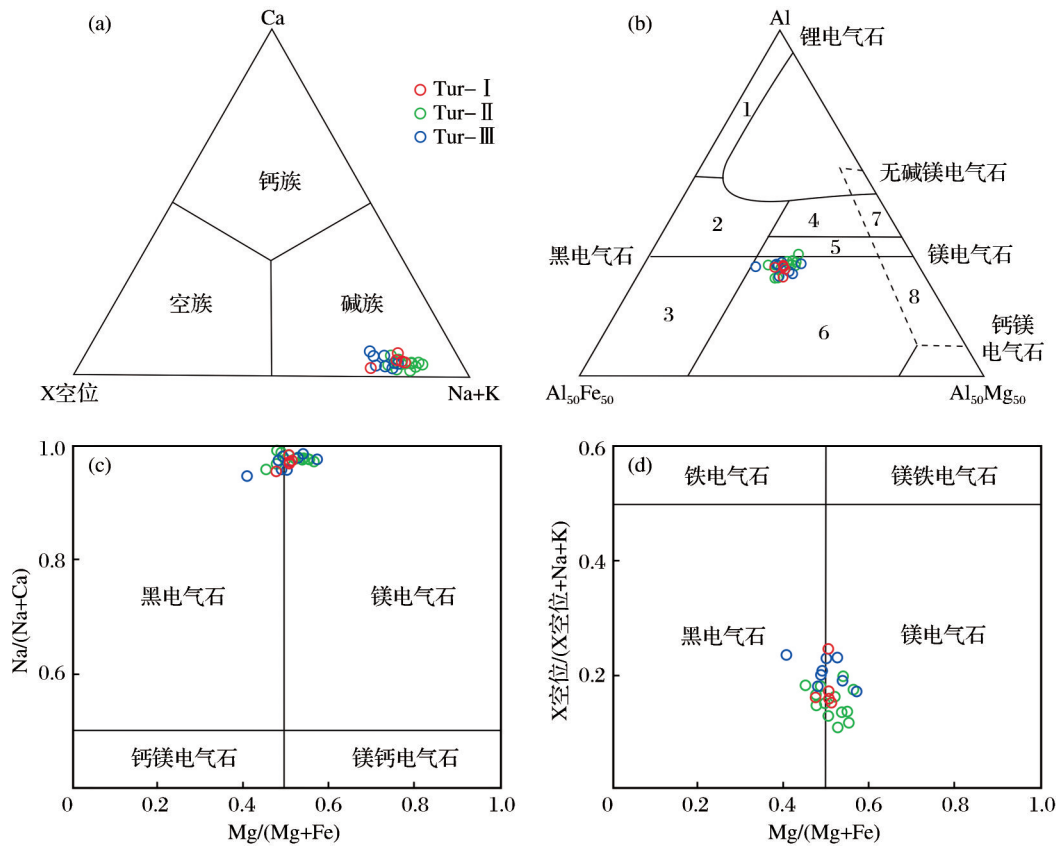
10⁻⁶)、Sc(2.9×10⁻⁶~124.0×10⁻⁶)、Sr(589×10⁻⁶~1 943×10⁻⁶)、Th(0.1×10⁻⁶~165.0×10⁻⁶)、Zn(106×10⁻⁶~8 244×10⁻⁶)和V(154×10⁻⁶~371.0×10⁻⁶)等元素具有较高的含量和较大的含量变化范围。Tur-I电气石的ΣREE含量约为37.7×10⁻⁶,其中LREE含量约为32.4×10⁻⁶,HREE含量约为5.3×10⁻⁶,LREE/HREE比值约为6.11。Tur-II电气石的ΣREE含量约为80.3×10⁻⁶,其中LREE含量约为59.3×10⁻⁶,HREE含量约为21×10⁻⁶,LREE/HREE比值约为2.82。Tur-III电气石的ΣREE含量约为110×10⁻⁶,其中LREE含量约为69.4×10⁻⁶,HREE含量约为41.2×10⁻⁶,LREE/HREE比值约为1.68。综上所述,达局电气石具有

富集轻稀土、亏损重稀土的特征;由Tur-I电气石、Tur-II电气石至Tur-III电气石,总的稀土含量呈增加的趋势,其中轻、重稀土含量均有所增加,而LREE/HREE比值呈下降趋势。在达局电气石的箱线图(图7)中,Ba、Be、Co、Cu、Ga、Rb和Sc等元素含量较低且相对集中,V和Zn元素含量较高且变化相对较大,总体元素变化范围相对稳定,表明3类电气石源区和形成环境相同。

4 讨论

4.1 电气石成因

电气石通常以副矿物的形式出现在不同矿床



(a)达局地区电气石X位置占位情况的分类图解(底图据Henry et al,2011);(b)达局地区电气石Al-Fe-Mg原岩判别图解(底图据Henry et al,1985);(c)Mg/(Mg+Fe)-Na/(Na+Ca)分类图;(d)Mg/(Mg+Fe)-X/(X+Na+K)分类图;区域1-8代表电气石可能的形成环境:1-富Li的花岗岩和伟晶岩、细晶岩;2-贫Li的花岗岩和伟晶岩、细晶岩;3-富Fe³⁺的石英—电气石岩(热液蚀变花岗岩);4-含Al饱和矿物的变质泥质岩和变质砂屑岩;5-不含Al饱和矿物的变质泥质岩和变质砂屑岩;6-富Fe³⁺石英—电气石岩、钙硅酸盐和变质沉积岩;7-贫Ca的变质超镁铁质岩和富Cr、V的变质泥质岩;8-变质碳酸盐岩和变质辉石岩(据Henry et al,1985)

图5 西藏达局地区电气石分类图解

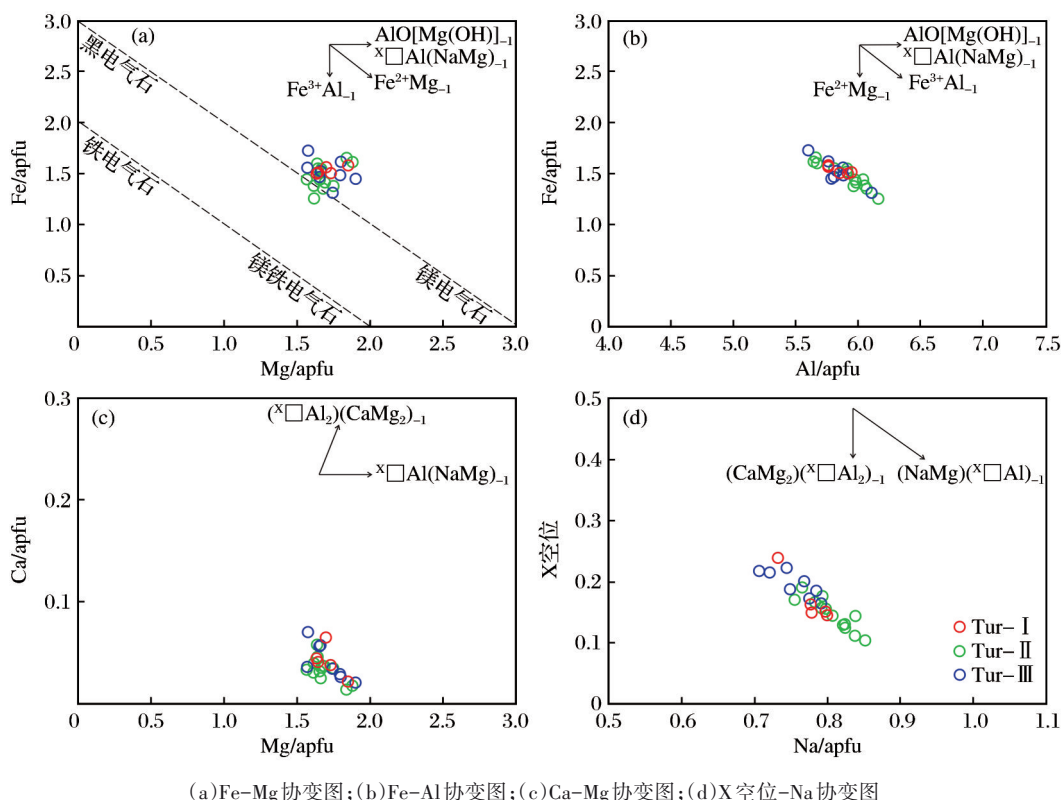
Fig. 5 Classification diagrams of tourmaline in Daju area, Xizang

类型和地质环境中(Henry et al, 1985; Slack et al, 2011)。根据成因类型,可将电气石划分为岩浆成因、热液成因和变质成因3类。London et al(1995)研究表明,岩浆成因的电气石以高的Fe/Mg比值和Al阳离子数(Y位上),且成分均匀无分带性为特征;而热液成因的电气石恰恰相反,一般具有高Mg含量、低或无Al阳离子数(Y位上),通常情况下能够观察到环带结构。达局电气石虽无明显的环带结构,但其高Mg含量(1.18~1.74 apfu)和Y位上基本无Al阳离子(0~0.03 apfu)的特征,与热液成因电气石十分类似。结合电气石的野外产状和手标本特征(图3),电气石多以脉体形式赋存于岩体中,周围岩石多发育绢英岩化和褐铁矿化等蚀变,表明晚期热液流体

侵入到围岩中形成电气石。此外,在Sr-V和Nb-V电气石成因判别图解(Sciuba et al,2021)中,达局地区电气石样品基本落入热液成因区域内,与朱诺地区热液成因电气石特征相似,而异于吉隆地区和错那地区岩浆成因电气石,表明达局地区电气石属于热液成因[图8(a)、8(b)]。

4.2 电气石类型

研究表明,电气石的主量和微量元素特征能够用来区分不同矿床类型(Hong et al,2017;Sciuba et al,2021;Beckett-Brown et al,2024)。Sciuba et al(2021)研究认为造山型金矿床中的电气石相比于其他矿床类型和地质环境中的电气石,具有高的Sr、V和Ni含量,低的Li、Be、Ga、Sn、Nb、Ta、U和Th含量。



(a) Fe-Mg 协变图; (b) Fe-Al 协变图; (c) Ca-Mg 协变图; (d) X空位-Na 协变图

图6 西藏达局地区电气石元素占位机制图解

Fig. 6 Diagrams of tourmaline elements occupation mechanism in Daju area, Xizang

达局电气石具有低的Li含量($<13 \times 10^{-6}$, 大多数样品低于检出限)和高的Sr含量($>589 \times 10^{-6}$)、Cu含量(除一个样品含量为 2.2×10^{-6} , 其余样品含量均大于 5×10^{-6}), 与造山型金矿中的电气石成分明显不同(Sciuba et al, 2021), 但与 Beckett-Brown et al (2024) 统计分析得出的斑岩型铜矿床中电气石的特征相似, 即斑岩型铜矿床中的电气石以相对亏损Li元素($<15 \times 10^{-6}$), 具有相对高的Sr含量($>100 \times 10^{-6}$)、Zr含量($>2.5 \times 10^{-6}$)、Cu含量($>5 \times 10^{-6}$)和低的Zn含量($<45 \times 10^{-6}$)为特征, 且大多数情况下具有高的As含量($>14 \times 10^{-6}$)。此外, Beckett-Brown et al (2023a) 对全球7个典型的斑岩型(Cu, \pm Au, \pm Mo)矿床中电气石化学组分进行研究, 提出了有效区分与斑岩型矿床相关的电气石的Sr/Pb-Zn/Cu-Ga三角图解(图9)。达局电气石具有易变的Zn/Cu比值(0.47~89.88), 高的Sr/Pb比值(5.78~78.23)和Ga含量(36.5×10^{-6} ~ 70.0×10^{-6}), 与朱诺斑岩型铜矿中电气石具有相似的特征, 而不同于吉隆地区和错那地区岩浆电气石。在Sr/Pb-Zn/Cu-Ga三角投图(图9)

中, 达局地区电气石和朱诺地区电气石绝大部分落入斑岩型铜矿电气石区域内; 而吉隆地区和错那地区电气石全部落入花岗岩和伟晶岩电气石区域内。这一结果暗示着达局地区电气石可能与斑岩型铜矿床有关。由图9可知, 相比于朱诺地区, 达局地区具有更高的Sr/Pb比值, 可能是由于达局地区的热液流体经历了较长距离的运移, 与周围围岩发生反应所致, 反映出达局地区的成矿距离相比朱诺地区较远。

4.3 找矿指示意义

Beckett-Brown et al (2023b) 对矿化的斑岩型系统中的电气石进行研究, 发现成矿斑岩系统中的电气石结构和主量元素具有以下特点: (1) 手标本多呈黑色, 为半自形—自形晶体, SEM-EDS分析结果表明其大多数为镁电气石, 极少数为黑电气石; (2) BSE图像表明其具有同心圆状和扇形分带; (3) 斑岩型矿床中电气石表现出一致的Mg值, 大多数电气石具有从富氧的镁电气石向富硼的镁电气石转变的趋势(O-P趋势), 反映了恒定Mg值条件

表3 西藏达局地区电气石微量元素分析结果

Table 3 Analysis results of trace elements of tourmaline in Daju area, Xizang ($\times 10^{-6}$)

样品类型	样品编号	Li	Sc	V	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Sr	Zr	Nb	Sn	Pb	Th	U
Tur-I	Tur1-3-2	-	20.7	226	41.5	8.2	174	43.3	-	1 104	0.3	0.4	5.8	18.0	1.4	0
	Tur1-3-3	-	6.7	218	22.9	33.6	266	52.5	10.3	1 373	0.9	0.4	9.1	29.4	4.1	0.1
	Tur2-6-1	-	48.5	322	72.7	6.2	144	63.0	5.5	1 088	1.3	1.1	16.5	21.0	1.0	0
	Tur2-6-2	-	23.6	328	84.7	5.3	165	57.9	-	1 727	0.4	0.5	9.9	22.5	1.0	-
	Tur2-6-3	-	67.4	338	77.8	7.9	140	61.3	6.1	1 245	1.3	1.8	17.5	24.9	2.9	0
Tur-II	Tur1-3-4	-	16.9	190	108.0	2.2	201	44.3	-	1 943	0.3	0.5	3.2	35.0	0.1	0
	Tur1-3-5	-	19.7	292	67.7	7.2	200	65.5	3.0	1 284	0.2	0.1	9.8	24.3	1.3	0
	Tur1-3-7	-	124.0	223	92.7	5.9	162	44.5	2.3	1 143	0.6	0.5	9.7	25.1	1.7	0
	Tur1-3-11	12.2	24.7	308	79.4	97.3	293	69.9	55.4	1 116	4.9	1.4	15.1	31.4	6.5	0.9
	Tur2-3-1	7.9	10.4	246	34.3	15.3	156	53.3	11.9	1 048	0.8	0.3	15.0	16.0	2.0	0.1
	Tur2-3-2	9.3	10.1	260	45.3	34.9	178	59.0	31.6	1 072	0.1	0.5	12.6	22.5	5.4	0.3
	Tur2-3-3	8.3	16.3	247	90.8	7.2	238	52.6	5.2	1 782	0.2	0.9	9.1	31.3	0.7	0
	Tur2-3-4	8.8	20.0	254	59.1	9.7	191	59.9	5.9	1 094	0.3	0.7	14.5	21.7	0.5	0
	Tur2-3-5	7.2	6.4	156	36.4	24.5	118	36.9	24.9	589	0.2	0.1	6.5	18.0	3.8	0.2
	Tur2-3-6	8.5	44.9	250	60.8	10.9	176	64.1	18.3	1 228	0.3	0.1	12.0	18.4	2.4	0.3
	Tur2-3-7	9.5	41.6	270	60.5	12.5	196	70.0	22.7	1 239	0.8	0.3	15.7	23.6	4.0	0.3
	Tur2-3-8	7.7	20.1	219	48.3	19.1	181	51.7	25.2	813	0.6	0.2	9.1	13.5	1.5	0.3
	Tur2-3-9	-	35.8	189	22.0	25.8	143	46.3	26.7	802	1.1	0.2	13.1	12.8	2.9	0.3
	Tur-III	Tur1-3-1	-	33.9	205	21.2	22.1	106	55.7	14.8	1 284	24.4	15.4	16.4	29.3	4.3
Tur1-3-12		-	92.0	272	187.0	1 770	824	54.7	1 501	830	3.0	1.2	5.8	144.0	165.0	19.1
Tur2-4-1		7.1	4.0	195	52.2	34.9	191	43.8	4.5	1 221	0.8	0.2	6.0	18.6	0.6	0
Tur2-4-2		6.1	2.9	154	47.6	18.9	139	36.5	2.8	1 097	1.3	0.2	2.9	18.0	0.4	0.1
Tur2-4-3		8.9	6.6	239	41.4	66.4	186	52.5	5.5	907	0.5	0.4	5.9	19.2	1.3	0
Tur2-4-4		9.2	4.4	178	60.4	53.8	172	43.0	3.4	1 346	2.0	0.5	3.0	28.0	2.5	0.1
Tur2-6-4		-	23.7	360	66.8	10.3	139	56.0	5.6	1 130	0.4	0.2	12.9	14.4	1.3	0
Tur2-6-6		-	33.0	371	57.7	12.3	147	64.5	8.4	1 080	0.5	0.3	16.1	14.6	2.2	-

注：“-”代表低于检出限

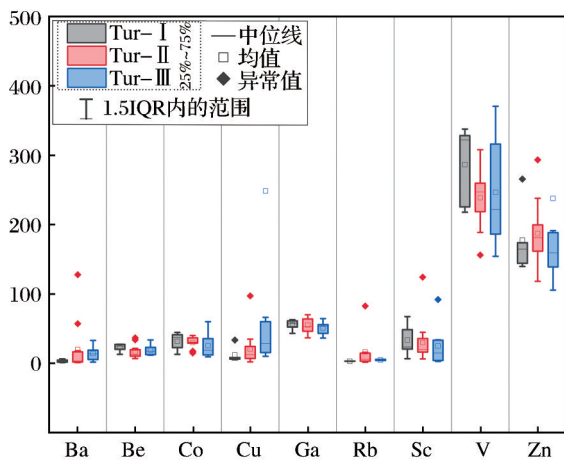
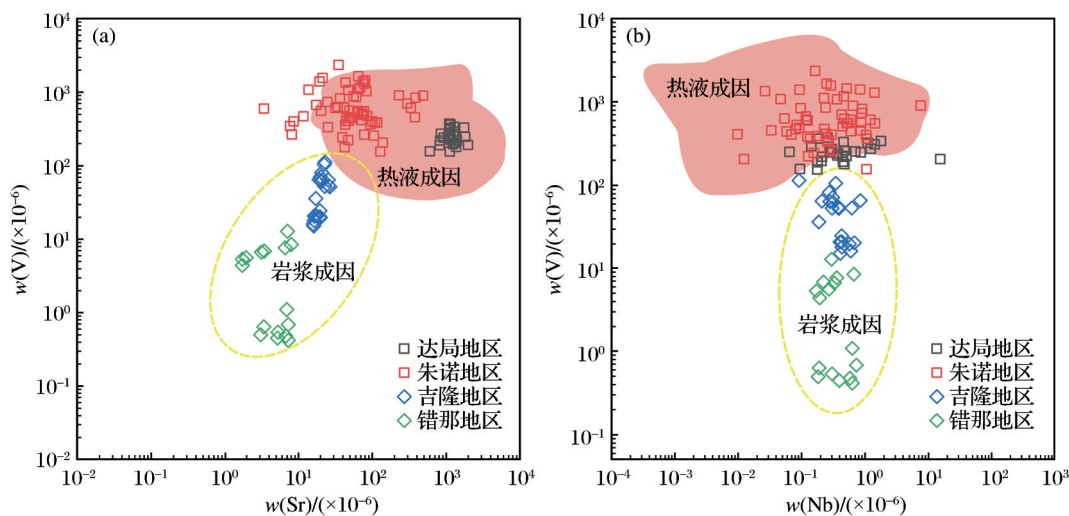


图7 西藏达局地区电气石微量元素图解

Fig. 7 Trace elements diagram of tourmaline in Daju area, Xizang

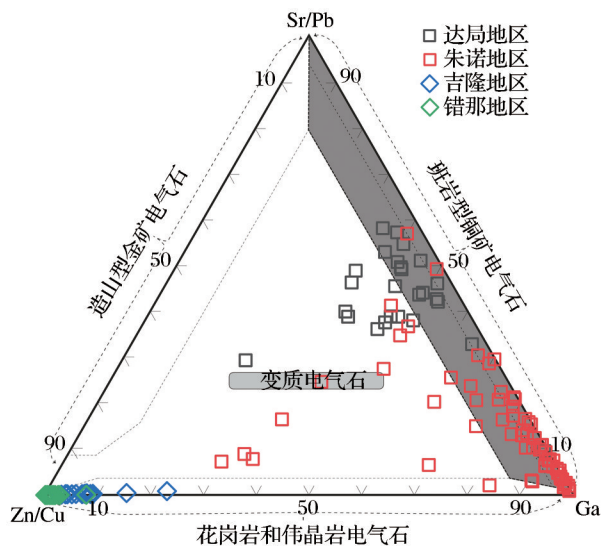
下 $Fe^{3+}Al_1$ 替换机制。达局地区虽然没有明显的分带特征,但其一致的 Mg 值(1.18~1.74 apfu)与弱的富氧的镁电气石向富硼的镁电气石转变的趋势,以及 $Fe^{3+}Al_1$ 替换机制,与矿化的斑岩型系统中的电气石表现一致(图 10)。现将达局地区电气石与朱诺斑岩型铜矿中电气石、喜马拉雅花岗岩和伟晶岩中电气石进行对比,判断其同源性。在球粒陨石稀土元素配分模式图[图 11(a)]中,达局地区和朱诺地区电气石均表现出富集轻、重稀土而亏损中稀土的下凹型配分模式;而吉隆地区和错那地区电气石表现出富集轻稀土、亏损重稀土的右倾模式。在微量元素蛛网图[图 11(b)]中,达局地区电气石具有富集 Rb、Th 和 Sr 等元素,亏损 Ba、Ta 和 Zr 等元素的特征,与朱诺地区电气石相似,而不同于吉隆地区



(a) Sr-V 协变图; (b) Nb-V 协变图; 朱诺地区数据来自 Zheng et al (2024); 吉隆地区数据来自 Pei et al (2023); 错那地区数据来自 Xie et al (2023a)

图 8 西藏达局地区电气石成因判别图解(修改自 Sciuba et al, 2021)

Fig. 8 Discrimination diagrams of tourmaline genesis in Daju area, Xizang (modified after Sciuba et al, 2021)



朱诺地区数据来自 Zheng et al (2024); 吉隆地区数据来自 Pei et al (2023); 错那地区数据来自 Xie et al (2023a)

图 9 西藏达局地区电气石矿床类型判别图解(底图据 Beckett-Brown et al, 2023a)

Fig. 9 Discrimination diagram of tourmaline deposit type in Daju area, Xizang (base map after Beckett-Brown et al, 2023a)

和错那地区电气石。上述结果表明,达局地区电气石和朱诺地区电气石可能具有相似的来源和地质过程,而不同于吉隆地区和错那地区电气石。此外,在 Ta-Ba 协变图[图 12(a)]中,达局地区电气石

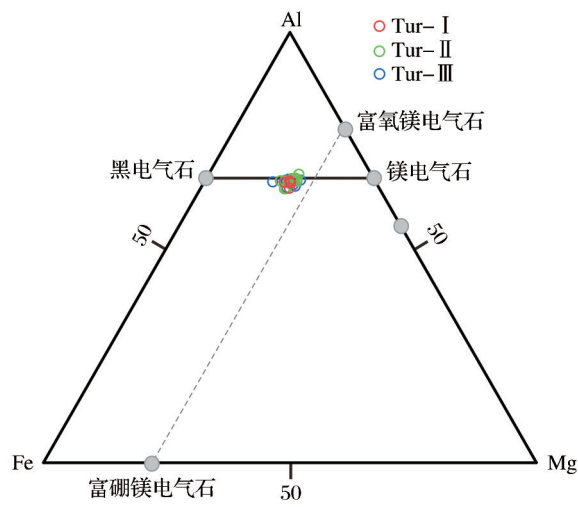
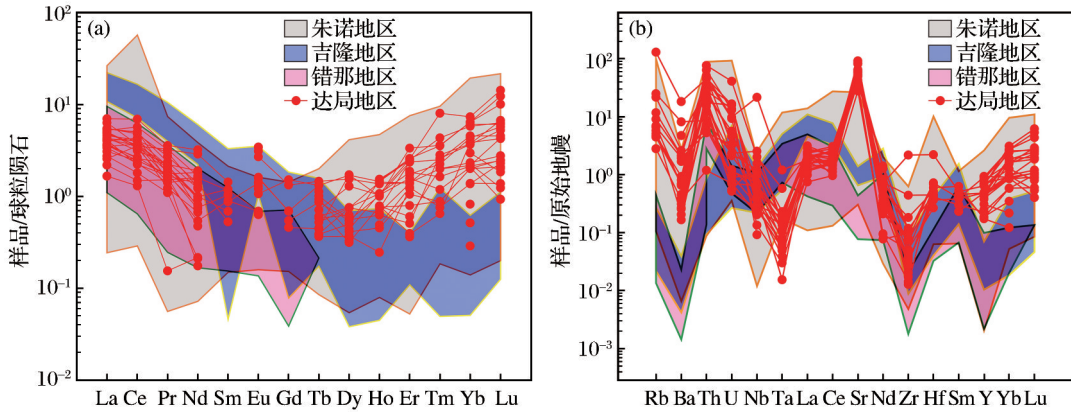


图 10 西藏达局地区电气石 Fe-Mg-Al 三元图解(修改自 Baksheev et al, 2012)

Fig. 10 Fe-Mg-Al ternary diagram of tourmaline in Daju area, Xizang (modified after Baksheev et al, 2012)

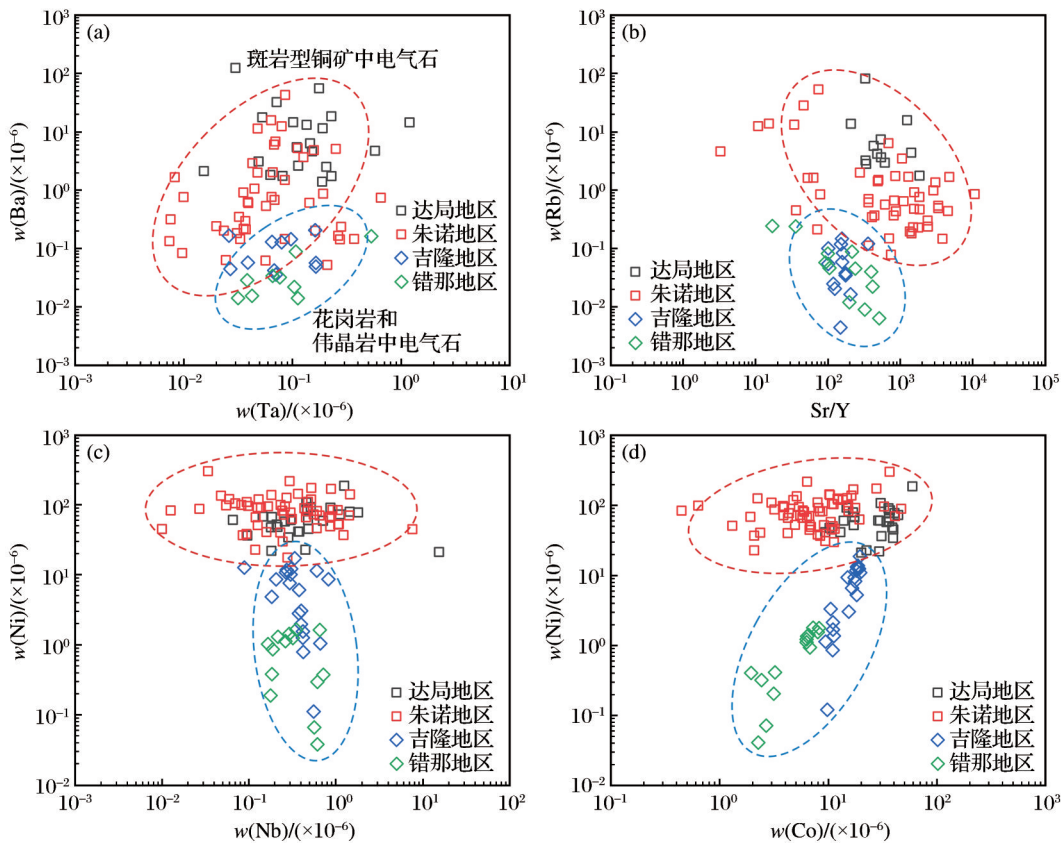
和朱诺地区电气石均表现出较高的 Ba 含量, Ta 与 Ba 呈正相关趋势,而吉隆地区电气石和错那地区电气石 Ba 含量较低且无明显变化趋势。在 Sr/Y-Rb 协变图[图 12(b)]中,达局地区和朱诺地区电气石具有较高 Rb 含量和 Sr/Y 比值, Sr/Y 与 Rb 呈负相关趋势,吉隆地区和错那地区电气石 Rb 含量和 Sr/Y 比值较低, Sr/Y 与 Rb 也呈负相关趋势。在 Nb-Ni 协变图[图 12(c)]中,达局地区和朱诺地区电气石



(a)电气石球粒陨石稀土元素配分模式图;(b)电气石微量元素蛛网图;球粒陨石原始数据来自 Boynton(1984),原始地幔数据来自 Sun et al(1989);朱诺地区数据来自 Zheng et al(2024);吉隆地区数据来自 Pei et al(2023);错那地区数据来自 Xie et al(2023a)

图 11 西藏达局地区电气石球粒陨石稀土元素配分模式图和电气石微量元素蛛网图

Fig. 11 Rare earth elements distribution pattern diagram of tourmaline chondrites and trace elements spider diagram of tourmaline in Daju area, Xizang



(a)Ta-Ba协变图;(b)Sr/Y-Rb协变图;(c)Nb-Ni协变图;(d)Co-Ni协变图;朱诺地区数据来自 Zheng et al(2024);吉隆地区数据来自 Pei et al(2023);错那地区数据来自 Xie et al(2023a)

图 12 不同地区电气石微量元素图解

Fig. 12 Diagrams of trace elements of tourmaline in different regions

具有高且相对恒定的Ni含量,沿水平方向变化,而吉隆地区和错那地区电气石Ni含量较低,Nb与Ni

呈负相关趋势。在Co-Ni协变图[图12(d)]中,达局地区和朱诺地区电气石特征与Nb-Ni协变图中

相似,而吉隆地区和错那地区电气石中Co与Ni呈正相关变化趋势。上述结果表明,达局地区电气石微量元素特征与朱诺斑岩型铜矿床中电气石特征相似,而有别于喜马拉雅淡色花岗岩与伟晶岩中锂铍矿化有关的电气石。此外,Baksheev et al(2012)认为电气石的Fe、Mg、Li、F含量以及 Fe^{3+}/Fe_{tot} 比值等参数能作为区分斑岩型矿床的指标。达局地区电气石具有中等且相近的Fe值(1.26~1.73 apfu)和Mg值(1.18~1.74 apfu),且Fe与Mg之间呈负相关关系(图13),表明达局地区电气石具有富Fe向富Mg转变的趋势。这一转变可能是由于 $Fe^{3+}/Fe_{tot}=0$,处于相对还原的环境,Fe元素以黄铁矿的形式沉淀导致的,这与野外观察到的石英—黄铁矿脉是一致的[图3(d)]。其次,达局地区电气石低的Li含量($<12.2\times 10^{-6}$)与Baksheev et al(2012)提出的斑岩型矿床中Li含量低于 30×10^{-6} 这一观点相吻合。而且,达局地区电气石具有较高的F含量(0~0.22%)和 H_2O 含量(3.45%~3.58%),与朱诺地区电气石相似(Zheng et al, 2024),指示其结晶于富含挥发分的流体。另外,达局地区Cu含量变化范围较大($2.2\times 10^{-6}\sim 1\ 770.0\times 10^{-6}$),表明达局地区具有富集成矿的潜力,建议后续开展进一步的查证工作。

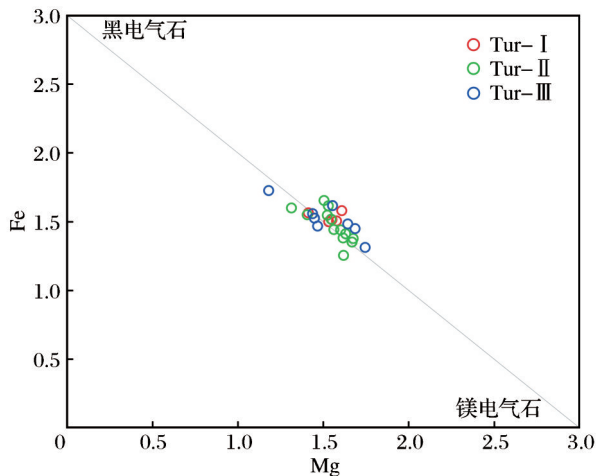


图13 西藏达局地区电气石Fe-Mg协变图

Fig. 13 Fe-Mg covariation diagram of tourmaline in Daju area, Xizang

5 结论

(1)达局地区电气石主要以脉体形式赋存于二

长花岗岩中,根据不同的形态特征可划分为3类,分别是Tur-I扇状电气石、Tur-II柱状电气石和Tur-III细粒状电气石。

(2)达局地区不同产状电气石主微量元素特征相似,属于碱基亚类镁电气石和黑电气石,替代机制为 $Fe^{3+}Al_{-1}$ 和 $(NaMg)^{(x)\square}Al_{-1}$ 。

(3)达局地区电气石高的Na含量和 $Fe^{3+}Al_{-1}$ 等价替换方式,表明区域内高氧逸度、高盐度的环境有利于金属离子迁移、富集成矿。达局地区电气石低的Zn/Cu比值,高的Sr/Pb比值和Ga含量,以及与朱诺地区电气石相似的微量元素特征,暗示着其具有形成斑岩型铜矿床的潜力。此外,电气石中Ni、Rb和Ba等元素相对富集的特点,也可能指示其形成于斑岩型矿床中。

参考文献 (References):

- Baksheev IA, Prokofiev VY, Zaraisky GP, et al, 2012. Tourmaline as a prospecting guide for the porphyry-style deposits [J]. *European Journal of Mineralogy*, 24(6): 957-979.
- Beckett-Brown C E, McDonald A M, McClenaghan M B, 2023a. Trace element characteristics of tourmaline in porphyry Cu systems: development and application to discrimination [J]. *The Canadian Journal of Mineralogy and Petrology*, 61(1): 31-60.
- Beckett-Brown C E, McDonald A M, McClenaghan M B, 2023b. Recognizing tourmaline in mineralized porphyry Cu systems: textures and major-element chemistry [J]. *The Canadian Journal of Mineralogy and Petrology*, 61(1): 3-29.
- Beckett-Brown C E, McDonald A M, McClenaghan M B, et al, 2024. Evaluating the application of texture and chemistry of detrital tourmaline as an indicator of porphyry Cu mineralization: a case study from the Casino porphyry Cu-Au-Mo deposit, Yukon, Canada [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 262: 107469.
- Boynton W V, 1984. Chapter 3-Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. *Developments in Geochemistry*, 2: 63-114.
- Chung S L, Chu M F, Ji J Q, et al, 2009. The nature and timing of crustal thickening in southern Tibet: geochemical and zircon Hf isotopic constraints from postcollisional adakites [J]. *Tectonophysics*, 477(1/2): 36-48.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, et al, 2003. Adakites from continen-

- tal collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 31(11): 1021-1024.
- Codeço M S, Weis P, Trumbull R B, et al, 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(3): 481-508.
- Guo J, Xiang L, Zhang R Q, et al, 2022. Chemical and boron isotopic variations of tourmaline deciphering magmatic-hydrothermal evolution at the Gejiu Sn-polymetallic district, South China[J]. *Chemical Geology*, 593: 120698.
- Guo R H, Hu X M, Garzanti E, et al, 2021. Boron isotope composition of detrital tourmaline: a new tool in provenance analysis[J]. *Lithos*, 400: 106360.
- Hawthorne F C, Henrys D J, 1999. Classification of the minerals of the tourmaline group[J]. *European Journal of Mineralogy*, 11(2): 201-216.
- Henry D J, Dutrow B L, 1996. Chapter 10. metamorphic tourmaline and its petrologic applications [M]//Boron: De Gruyter: 503-558.
- Henry D J, Guidotti C V, 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine [J]. *American Mineralogist*, 70(1/2): 1-15.
- Henry D J, Nováček M, Hawthorne F C, et al, 2011. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals [J]. *American Mineralogist*, 96(5/6): 895-913.
- Hong W, Cooke D R, Zhang L J, et al, 2017. Tourmaline-rich features in the Heemskirk and Pieman Heads granites from western Tasmania, Australia: characteristics, origins, and implications for tin mineralization[J]. *American Mineralogist*, 102(4): 876-899.
- Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, et al, 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen [J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1/2/3): 25-51.
- 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.
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, et al, 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 262(3/4): 229-245.
- Ji W Q, Wu F Y, Liu C Z, et al, 2012. Early Eocene crustal thickening in southern Tibet: new age and geochemical constraints from the Gangdese batholith [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 82-95.
- Jiang S Y, 1998. Stable and radiogenic isotope studies of tourmaline: an overview [J]. *Journal of the Czech Geological Society*, 43(1/2): 75-90.
- Lee H Y, Chung S L, Ji J Q, et al, 2012. Geochemical and Sr - Nd isotopic constraints on the genesis of the Cenozoic Linzizong volcanic successions, southern Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 96-114.
- Liu T, Jiang S Y, Su H M, et al, 2023. Tourmaline as a tracer of magmatic-hydrothermal evolution and potential Nb-Ta-(WSn) mineralization from the Lingshan granite batholith, Jiangxi Province, southeast China [J]. *Lithos*, 438: 107016.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al, 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.
- Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, et al, 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet [J]. *Lithos*, 96(1/2): 225-242.
- Mo X X, Niu Y L, Dong G C, et al, 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: a case study of the Paleogene Linzizong volcanic Succession in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 250(1/2/3/4): 49-67.
- Pearce N J G, Perkins W T, Westgate J A, et al, 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST srm 610 and NIST srm 612 glass reference materials [J]. *Geostandards Newsletter*, 21(1): 115-144.
- Pei Q M, Ma S B, Li C H, et al, 2023. In-situ boron isotope and chemical composition of tourmaline in the Gyirong pegmatite, southern Tibet: implications for petrogenesis and magma source [J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1037727.
- Rosenberg P E, Foit F F, 1979. Synthesis and characterization of alkali-free tourmaline [J]. *American Mineralogist*, 64(1/2): 180-186.
- Sciuba M, Beaudoin G, Makvandi S, 2021. Chemical composition of tourmaline in orogenic gold deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 56(3): 537-560.
- Slack J F, Trumbull R B, 2011. Tourmaline as a recorder of ore-

- forming processes[J].*Elements*, 7(5):321-326.
- Song S Y, Cao D Y, Zhang Q C, et al, 2018. Apatite fission track evidence for Miocene denudation history in the Gangdese conglomerate belt and Yarlung Tsangpo River: implications for the evolution of southern Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 159-167.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345.
- 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.
- Wen D R, 2007. The Gangdese batholith, southern Tibet: ages, geochemical characteristics and petrogenesis [D]. Taipei: Taiwan University.
- Wu S, Zheng Y Y, Sun X, 2016. Subduction metasomatism and collision-related metamorphic dehydration controls on the fertility of porphyry copper ore-forming high Sr/Y magma in Tibet [J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 83-103.
- Xie G Z, Yan H B, Li G M, et al, 2023a. Elemental and boron isotopic variations in tourmaline in two-mica granite from the Cuona area, Tibet: insights into the evolution of leucogranitic melt [J]. *Geochemistry*, 83(1): 125924.
- Xie G Z, Yan H B, Zhang R Q, et al, 2023b. Hydrothermal fluid evolution in the Cuonadong Sn-W-Be polymetallic deposit, southern Tibet: indicated by the in-situ element and boron isotope compositions of tourmaline [J]. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1106871.
- Yang S Y, Jiang S Y, Palmer M R, 2015a. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Nyalam leucogranites, South Tibetan Himalaya: implication for their formation from B-rich melt to hydrothermal fluids [J]. *Chemical Geology*, 419: 102-113.
- Yang S Y, Jiang S Y, Zhao K D, et al, 2015b. Tourmaline as a recorder of magmatic-hydrothermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(5): 42.
- Yao J M, Li F L, Ma G Z, et al, 2024. Tourmaline chemical composition and boron isotopic composition at the Longmenshan pegmatite in Dahongliutan area, West Kunlun: implication for rare-metal Li-Be mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 167: 105987.
- Zhang J W, Dai J G, Qian X Y, et al, 2017. Sedimentology, provenance and geochronology of the Miocene Qiuwu formation: implication for the uplift history of southern Tibet [J]. *Geoscience Frontiers*, 8(4): 823-839.
- Zhao H D, Zhao K D, Palmer M R, et al, 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.
- Zhao S R, Hu H, Jin X Y, et al, 2024. Chemical and boron isotopic composition of tourmaline from the Yixingzhai gold deposit, North China Craton: proxies for ore fluids evolution and mineral exploration [J]. *American Mineralogist*, 109(8): 1443-1460.
- Zhao Z, Yang X Y, Liu Q Y, et al, 2021. 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*, 386: 106010.
- Zheng Y C, Hou Z Q, Li Q Y, et al, 2012a. Origin of Late Oligocene adakitic intrusives in the southeastern Lhasa terrane: evidence from in situ zircon U-Pb dating, Hf-O isotopes, and whole-rock geochemistry [J]. *Lithos*, 148: 296-311.
- Zheng Y C, Hou Z Q, Li W, et al, 2012b. Petrogenesis and geological implications of the Oligocene chongmuda-mingze adakite-like intrusions and their mafic enclaves, southern Tibet [J]. *The Journal of Geology*, 120(6): 647-669.
- Zheng Y Y, Chen X, Palmer M R, et al, 2024. Magma mixing and magmatic-to-hydrothermal fluid evolution revealed by chemical and boron isotopic signatures in tourmaline from the Zhunuo-Beimulang porphyry Cu-Mo deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 59(6): 1133-1153.
- Zheng Y Y, Sun X, Gao S B, et al, 2015. Metallogensis and the minerogenetic series in the Gangdese polymetallic copper belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 23-39.
- Zhou Q, Li W C, Wang G C, et al, 2019. Chemical and boron isotopic composition of tourmaline from the Conadong leucogranite-pegmatite system in South Tibet [J]. *Lithos*, 326: 529-539.
- 戴加祺, 黎广荣, 郭福生, 等, 2018. 江西相山铀矿田含铀碎斑熔岩中电气石化学成分及硼同位素组成特征 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 48(5): 1378-1393.
- Dai Jiaqi, Li Guangrong, Guo Fusheng, et al, 2018. Chemical components and boron isotopic composition of tourmaline of uranium bearing porphyroclastic lava in Xiangshan, Jiangxi [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(5): 1378-1393.

- 付文春,康志强,潘会彬,2014.西藏冈底斯带西段狮泉河地区林子宗群火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].地质通报,33(6):850-859. Fu Wenchun, Kang Zhiqiang, Pan Huibin, 2014. Geochemistry, zircon U-Pb age and implications of the Linzizong Group volcanic rocks in Shiquan River area, western Gangdise belt, Tibet [J]. Geological Bulletin of China, 33(6):850-859.
- 侯增谦,曲晓明,杨竹森,等,2006.青藏高原碰撞造山带:Ⅲ.后碰撞伸展成矿作用[J].矿床地质,25(6):629-651. Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, et al, 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: Ⅲ. Mineralization in post-collisional extension setting [J]. Mineral Deposits, 25(6):629-651.
- 李廷栋,2002.青藏高原地质科学研究的新进展[J].地质通报,21(7):370-376. Li Tingdong, 2002. New progress in the geoscience study of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Regional Geology of China, 21(7):370-376.
- 毛景文,王平安,王登红,等,1993.电气石对成岩成矿环境的示踪性及应用条件[J].地质论评,39(6):497-507. Mao Jingwen, Wang Ping'an, Wang Denghong, et al, 1993. The tracer of tourmaline for rock-forming and metallogenic environments and its applied conditions [J]. Geological Review, 39(6):497-507.
- 孙祥,郑有业,吴松,等,2013.冈底斯明则—程巴斑岩—矽卡岩型 Mo-Cu 矿床成矿时代与含矿岩石成因[J].岩石学报,29(4):1392-1406. Sun Xiang, Zheng Youye, Wu Song, et al, 2013. Mineralization age and petrogenesis of associated intrusions in the Mingze-Chengba porphyry-skarn Mo-Cu deposit, Gangdese [J]. Acta Petrologica Sinica, 29(4):1392-1406.
- 杨宗耀,胡古月,肖洪天,等,2019.西藏汤白矿区下白垩统比马组砂岩地球化学特征:对冈底斯南缘构造演化的启示[J].岩石学报,35(7):2189-2205. Yang Zongyao, Hu Guyue, Xiao Hongtian, et al, 2019. Geochemical characteristics of the Early Cretaceous sandstones from the Tangbai deposit, Tibet: implications for the tectonic evolution of the southern margin of the Gangdese [J]. Acta Petrologica Sinica, 35(7):2189-2205.
- 郑有业,吴松,次琼,等,2021.冈底斯复合造山带铜钼金多金属成矿作用与成矿系列[J].地球科学,46(6):1909-1940. Zheng Youye, Wu Song, Ci Qiong, et al, 2021. Cu-Mo-Au metallogenesis and minerogenetic series during superimposed [J]. Earth Science, 46(6):1909-1940.
- 朱弟成,赵志丹,牛耀龄,等,2012.拉萨地体的起源和古生代构造演化[J].高校地质学报,18(1):1-15. Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, et al, 2012. Origin and Paleozoic tectonic evolution of the Lhasa Terrane [J]. Geological Journal of China Universities, 18(1):1-15.

Geochemical Characteristics and Prospecting Significance of Tourmaline Veins in Daju Area, Tibet

LI Qinggong¹, CI Qiong², WU Song¹, PANG Bei¹, ZHENG Youye¹

1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Tibet Autonomous Region Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Lhasa 850003, Xizang, China

Abstract: The Daju area is situated in Angren County, Xigaze City, Tibet, approximately 30 km southwest of the Zhunuo super large porphyry copper deposit. The Daju granite hosts a substantial development of tourmaline veins, which vary in width and can reach up to 1 meter at their widest point. Comprehensive analyses, including electron probe microanalysis and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), have been conducted to elucidate the genesis, geochemical characteristics, and prospecting implications of these tourmaline veins. Based on microscopic examination and morphological characteristics, tourmaline in the Daju area can be categorized into three distinct types: (1) Fan-shaped tourmaline (Tur- I), predominantly subhedral to euhedral, exhibiting yellowish-brown to greenish-blue pleochroism, and possessing the largest particle size; (2) Cylindrical tourmaline (Tur- II), also subhedral to euhedral, primarily short columnar with cross-sections often triangular or polygonal, displaying yellow-green pleochroism and medium particle size; (3) Fine granular

tourmaline (Tur- III), mostly anhedral and granular, generally amorphous, with yellowish-orange to green pleochroism, and characterized by the smallest particle size. All types of tourmalines have moderate $Mg/(Mg+Fe)$ ratio, high $Na/(Na+Ca)$ ratio, and low $X_{Al}/(X_{Al}+Na+K)$ ratio, belonging to the alkali group dravite tourmaline-black tourmaline solid solution series, and the main replacement mechanism of elements is $Fe^{3+}Al_1$ and $(NaMg)(X_{Al}Al)_1$. The elevated magnesium content ($1.18\sim 1.74$ apfu), strontium content ($589\times 10^{-6}\sim 1\ 943\times 10^{-6}$), vanadium content ($154\times 10^{-6}\sim 371\times 10^{-6}$), and the absence of aluminum cation at the Y position in the three types of tourmalines suggest a hydrothermal origin. In the graphical projection for Sr/Pb-Zn/Cu-Ga deposit type discrimination, tourmaline from the Daju area predominantly falls within the transition zone from metamorphic tourmaline to porphyry copper deposits. This suggests a potential genetic link between the formation of tourmaline in the Daju area and porphyry copper deposits. Trace element analysis reveals that Daju tourmaline exhibits a high Sr/Y ratio, elevated levels of Ba, Rb, and Ni, and a low Li content. These geochemical characteristics align with those observed in the Zhunuo porphyry copper deposit but differ from tourmalines associated with lithium and beryllium mineralization in the leucogranites of the Gyirong and Cuona regions in southern Tibet. This indicates that the Daju area holds significant potential for the formation of porphyry copper deposits, warranting further exploration efforts.

Key words: tourmaline veins; geochemical characteristics; genetic type; prospecting instruction; Daju area; Tibet

近 1 500 t! 我国有望诞生又一世界级金矿

9月10日,国新办举行“高质量完成‘十四五’规划”系列主题新闻发布会。会上,自然资源部副部长、中国地质调查局局长许大纯透露,辽宁省大东沟金矿初步评审金资源量近1 500 t,有望成为继山东胶东金矿之后我国又一个世界级的金矿。

许大纯表示,矿产资源是经济社会发展的重要物质基础,“十四五”以来,我们会同有关部门组织实施了新一轮找矿突破战略行动,累计投入资金近4 500亿元,取得了一批重大的找矿突破成果,能源资源保障能力逐步提升、结构不断优化。

许大纯介绍,大宗矿产方面,老资源基地焕发新机,新资源基地相继崛起。

在老资源基地方面,山西孝义铝土矿、山东胶东金矿、辽宁鞍山铁矿、黑龙江多宝山铜矿和西藏巨龙铜矿、多龙铜矿等新增储量都非常可观,大大延长了这些矿山的寿命和年限。

同时,新的一些资源基地也在崛起,比如云南镇雄富磷矿、青海茫崖深层卤水钾盐矿。他特别提到,辽宁省大东沟金矿初步评审金资源量近1 500 t,

有望成为继山东胶东金矿之后我国又一个世界级的金矿。

据此前报道,2024年,我国新一轮金矿找矿突破战略取得新进展。三山岛等24座矿山深边部共新增资源量1 570 t;辽宁盖州大东沟地区发现低品位、超大型金矿,预估资源量超1 000 t;在胶东地区,山东莱州西岭金矿成为我国最大单体金矿床,纱岭、海域金矿已攻克超深竖井建设等多项难题,进入全面冲刺的关键阶段。

据2025年2月底自然资源部发布的《2024年中国自然资源公报》,截至2023年底,我国金矿资源储量为3 203.77 t。

山东胶东地区是世界第三大金矿区,其中莱州西岭金矿为全国最大单体金矿床,也是目前国内发现的深度最大金矿。据自然资源部数据,2023年8月,莱州西岭金矿经山东省自然资源厅备案,累计探获金金属量592.186 t。山东省政府新闻办早前披露,“十四五”期间,山东新增金资源量583 t,居全国首位,提前完成“十四五”找矿任务。

(来源:观察者网)