

藏南错那洞穹隆高分异淡色花岗岩的矿物学特征

张丁川¹, 张刚阳^{1,2}, 陈曦^{1,3}, 杨宾¹

(1. 成都理工大学 地球科学学院 自然资源部构造矿产成矿重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 西藏华钰矿业股份有限公司, 西藏 拉萨 850032; 3. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要: 藏南特提斯喜马拉雅东部的错那洞淡色花岗岩产出有白云母、石榴子石、电气石等特征性矿物, 显示具有高度分异岩浆岩的特征。从二云母花岗岩到电气石花岗岩到石榴子石花岗岩, 碱性长石均为正长石, 斜长石从更长石演变为钠长石, 白云母 Al_2O_3 、 Na_2O 含量逐渐升高, 反映花岗岩逐渐向富 Al 富 Na 演化的趋势。二云母花岗岩中黑云母 X_{Fe} 值、 Al^{VI} 逐渐升高, 表明二云母花岗岩之间存在结晶分异演化。电气石 X_{vac} 值、Al、Mg 和 Fe 含量之间的变化, 反映电气石花岗岩到花岗岩伟晶岩岩浆结晶环境中 Na 含量的增加, 表明花岗岩伟晶岩结晶分异演化程度高于电气石花岗岩。石榴子石高 X_{Fe} 、 X_{Mn} 值的特征, 也是高分异花岗岩的标志。上述矿物学研究结果表明, 错那洞二云母花岗岩是由岩浆早期结晶矿物与残余的母岩浆组成的糊状物经过长期结晶形成的, 而电气石花岗岩和石榴子石花岗岩由从晶粥体中分离出来的衍生熔体形成。

关键词: 错那洞穹隆; 淡色花岗岩; 高分异; 矿物学

中图分类号: P588.12⁺1; P575.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)06-1093-23

Mineralogical characteristics of highly fractionated leucogranite in Cuonadong dome, southern Tibet

ZHANG Ding-chuan¹, ZHANG Gang-yang^{1,2}, CHEN Xi^{1,3} and YANG Bin¹

(1. College of Earth Science and Ministry of Natural Resources Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Tibet Huayu Mining Co., Ltd., Lhasa 850032, China; 3. College of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Leucogranitic rocks, crop out in the eastern Tethys Himalaya Cuonadong dome, southern Tibet, have characteristic minerals such as muscovite, garnet and tourmaline, and show the characteristics of highly differentiated magmatic rocks. From two-mica granite, tourmaline granite to garnet granite, alkaline feldspar is orthoclase, plagioclase evolved from oligoclase to albite, the content of Al_2O_3 and Na_2O in muscovite increased gradually, reflecting the evolution trend of granite towards aluminum-rich and sodium-rich. In the two-mica granite, the X_{Fe} and Al^{VI} of biotite increase gradually, which indicates that there is crystallization differentiation evolution in the two-mica granites. The variation of the contents of X_{vac} , Al, Mg and Fe in tourmaline reflects the increase of Na content in the magmatic crystallization environment from tourmaline granite to granite pegmatite, indicating that the degree of crystallization differentiation of granite pegmatite is higher than that of tourmaline granite. The characteristics of garnet with high X_{Fe} and X_{Mn} values are also the marks of highly fractionated granites. The Cuonadong two-mica granite

收稿日期: 2020-12-25; 接受日期: 2021-06-21; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0601505); 国家自然科学基金项目(41302066); 西藏华钰矿业股份有限公司博士后基金项目(80303-SHX070); 成都理工大学中青年骨干教师培养计划项目(KYGG201402)

作者简介: 张丁川(1996-), 男, 矿物学岩石学矿床学硕士研究生, E-mail: 429475440@qq.com; 通讯作者: 张刚阳(1982-), 男, 博士, 从事固体矿产勘查的教学和研究, E-mail: zhanggangyang@163.com。

网络首发时间: 2021-08-20; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20210820.1018.002.html>

was formed by long-term crystallization of a crystal mush composed of early magmatic crystalline minerals and residual parent magma, while tourmaline granite and garnet granite are formed by derivative melts separated from crystal mush.

Key words: Cuonadong dome; leucogranitic; differentiation of leucogranitic; mineralogy

Fund support: National Key Research and Development Program of China (2017YFC0601505); National Natural Science Foundation of China (41302066); Postdoctoral Fund of Tibet Huayu Mining Co., Ltd. (80303-SHX070); Chengdu University of Technology Training Program for Young and Middle-Aged Key Teachers (KYGG201402)

喜马拉雅造山带中下地壳变质沉积岩发生不同类型的部分熔融过程(Le Fort, 1975; 曾令森等, 2017),形成的岩浆经历结晶分异作用,形成了广泛分布的强过铝质、高分异的花岗岩(吴福元等, 2015; Liu *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020)。近年来,在喜马拉雅造山带佩枯措、夏如、康马、告乌、然巴等数十个淡色花岗岩体中发现了绿柱石、铌铁矿、烧绿石、铌铁金红石等稀有金属矿物(王汝成等, 2017; Xie *et al.*, 2020),揭示出高度演化的喜马拉雅淡色花岗岩具有形成稀有金属矿床的潜力。

错那洞穹隆是喜马拉雅造山带首个进行勘查并圈定稀有多金属矿体的穹隆。错那洞穹隆的祥林、余纳杂、日纳、曲嘎尔北等4个矿段均发现热液脉型钨锡铍矿、矽卡岩型钨锡铍矿和花岗岩型铷铯稀有金属矿(李光明等, 2017; 董汉文等, 2017)。错那洞淡色花岗岩分布于错那洞穹隆核部,主体为二云母花岗岩、白云母花岗岩,其次为石榴子石花岗岩、电气石花岗岩、花岗伟晶岩等。二云母花岗岩与大理岩、石榴子石黑云母片岩接触带发育矽卡岩,形成白钨矿、锡石、羟硅铍石、铅铍闪石等矿石矿物(梁维等, 2018)。花岗伟晶岩脉不同程度地发育绿柱石、锡石、黑钨矿等金属矿物(Xie *et al.*, 2020)。二云母花岗岩、电气石花岗岩和石榴子石花岗岩等岩体本身属于铷的矿化体,含铷矿物主要为长石和云母(夏祥标等, 2019)。岩石地球化学和矿床学的研究认为,错那洞中新世的二云母花岗岩、电气石花岗岩、石榴子石花岗岩等属于高分异淡色花岗岩,并且与钨锡铍矿成矿作用密切相关(梁维等, 2018; 张林奎等, 2018; 夏祥标等, 2019)。淡色花岗岩高度结晶分异演化过程和稀有元素在熔体中过饱和行为被认为是稀有金属成矿的关键因素之一(Xie *et al.*, 2020)。

错那洞花岗岩在矿物组合与矿物成分上显示出一系列的变化。从二云母花岗岩、电气石花岗岩到石榴子石花岗岩,钾长石和黑云母的含量下降,钠长

石、白云母等矿物含量增多,电气石、石榴子石、铌铁矿等特征矿物开始出现(吴福元等, 2015; Wu *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2020)。作为花岗岩的重要副矿物,电气石、石榴子石等矿物的结构和化学变化记录了花岗岩浆演化过程的重要信息(Dutrow and Henry, 2018)。前人通过研究这些淡色花岗岩取得了大量的成果(吴福元等, 2015; 王晓先等, 2016; 李光明等, 2017; 董汉文等, 2017; 王汝成等, 2017; Liu *et al.*, 2019; 代作文等, 2019; Wu *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2020),但有关不同类型淡色花岗岩之间矿物的元素演化特征的讨论仍然较少。本文以错那洞穹隆核部的二云母花岗岩、电气石花岗岩、石榴子石花岗岩和花岗伟晶岩等淡色花岗岩为研究对象,利用电子探针技术,分析淡色花岗岩高度结晶分异过程中的矿物化学成分变化,探讨藏南高分异花岗岩矿物的元素演化特征。

1 区域地质特征

喜马拉雅地体位于雅鲁藏布江缝合带南侧,北部为特提斯喜马拉雅,中部为高喜马拉雅,南部为低喜马拉雅,它们由南向北依次被主中央逆冲断层(MCT)和藏南拆离系(STDS)隔开(Debon *et al.*, 1986; Yin and Harrison, 2000)。喜马拉雅花岗岩主要沿着东西向展布的南北两条带分布。北带为特提斯喜马拉雅花岗岩带,花岗岩多产于特提斯喜马拉雅片麻岩穹隆的核部(图1a, Zeng *et al.*, 2014)或侵入特提斯喜马拉雅沉积岩系中,代表性淡色花岗岩由东至西有雅拉香波、然巴、康马、拉轨岗日、馬拉山等岩体(张宏飞等, 2005; 吴福元等, 2015; Liu *et al.*, 2019);南带为高喜马拉雅花岗岩带,分布在藏南拆离系周围及高喜马拉雅构造单元,主要沿藏南拆离系侵位于高喜马拉雅变质岩系中(Le Fort, 1975; Harrison *et al.*, 1997),代表性淡色花岗岩由东至西有错那、拉隆、库拉岗日、定结、吉隆等岩体。

喜马拉雅花岗岩岩性以二云母花岗岩为主,常呈岩基状产出;其次是电气石花岗岩、石榴子石花岗岩、伟晶岩等,以脉状形式侵入二云母花岗岩或者围岩

中。喜马拉雅花岗岩形成于 44~7 Ma,大部分花岗岩体形成于 25~14 Ma(Wu *et al.*, 2020),与藏南拆离系向北大规模伸展拆离时间一致。

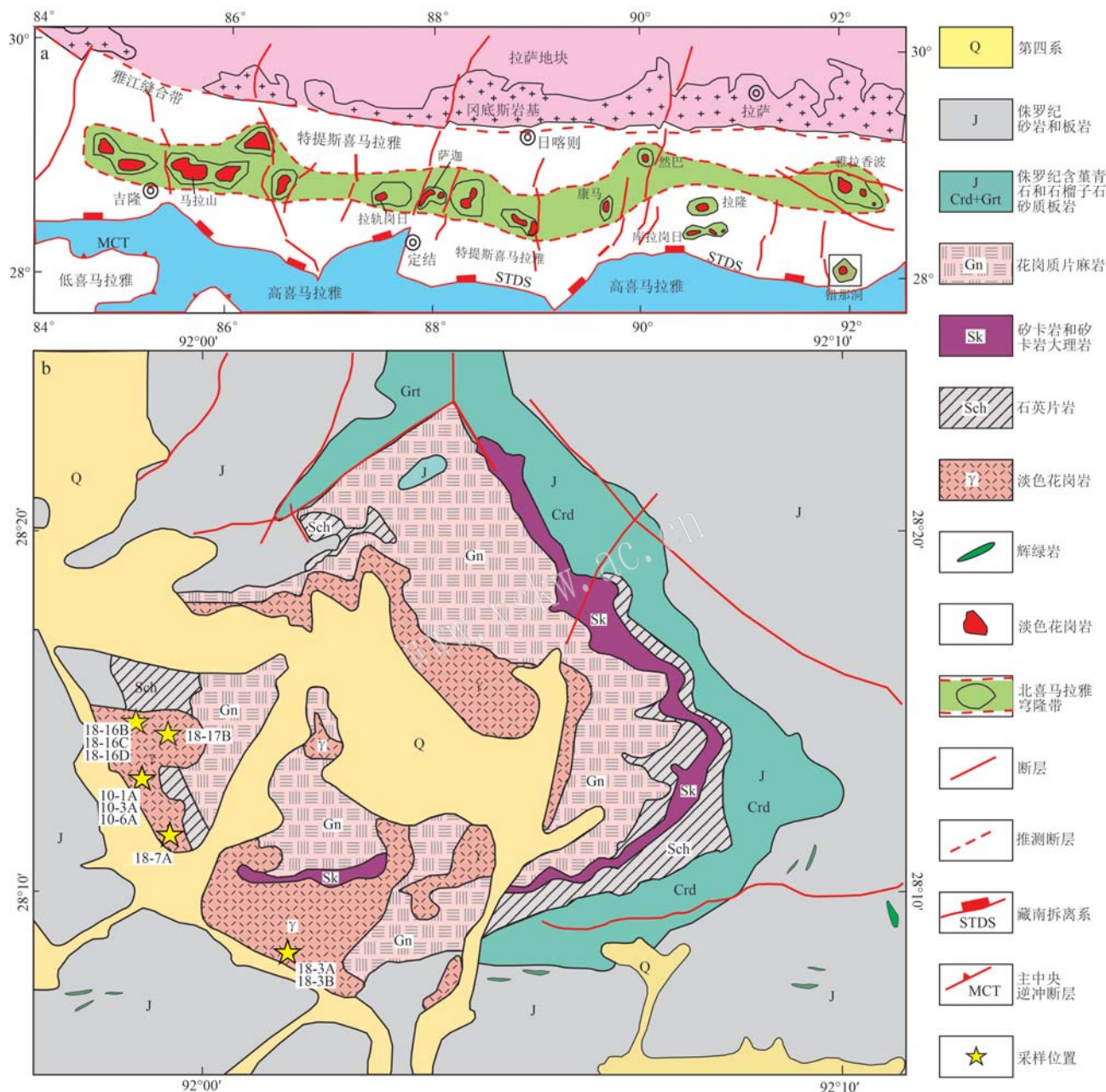


图 1 特提斯喜马拉雅淡色花岗岩分布图[a, 据 Zeng 等 (2014)]及错那洞穹隆地质简图[b, 修改自付建刚等 (2018)]
Fig. 1 The distribution of the Tethys Himalaya leucogranite belt(a, after Zeng *et al.*, 2014) and sketch geological map of the Cuonadong dome(b, after Fu Jiangang *et al.*, 2018)

错那洞穹隆地处特提斯喜马拉雅构造单元东段,紧靠藏南拆离系上盘。错那洞穹隆由外到内可以划分为盖层、滑脱系和核部 3 个部分(图 1b, 付建刚等, 2018)。最上面盖层主要为侏罗系日当组由泥质粉砂质板岩和片岩组成的变质岩。中间滑脱系

主要为含石榴子石-蓝晶石-十字石黑云母石英片岩夹中薄层大理岩,其次是含矽线石二云母花岗片麻岩、含电气石花岗质片麻岩和石榴子石白云母片麻岩等,从上到下变质程度逐渐加深。大理岩内断续发育有矽卡岩化蚀变,局部见有钨锡铍矿化(梁维

等, 2018)。穹窿核部主要为糜棱状花岗质片麻岩和错那洞淡色花岗岩(图 2a, 张林奎等, 2018)。前人通过地球化学研究认为, 错那洞淡色花岗岩起源于高喜马拉雅变泥质岩, 是经历了深度的部分熔融之后, 在岩浆上侵过程中发生了高程度的岩浆分异结晶过程, 形成的高度演化的花岗岩(黄春梅等, 2018; 梁维等, 2018; Xie *et al.*, 2020)。

已有的锆石/独居石的 U-Th-Pb 年代学分析认为, 错那洞穹窿内二云母花岗岩形成于 20.6~16.5 Ma(张林奎等, 2018; 夏祥标等, 2019), 电气石花岗岩形成于 19.7 Ma(林斌等, 2016), 石榴子石花岗岩形成于 21.8~15.9 Ma(董汉文等, 2017; 高利娥等, 2017; 黄春梅等, 2018; 张林奎等, 2018)。矽卡岩型铍钨锡矿和花岗岩中铌铁矿形成时间分别为 17.4 Ma 和 14.4 Ma(Xie *et al.*, 2020)。前人的年代学数据表明错那洞二云母花岗岩、电气石花岗岩、石榴子石花岗岩在 21~16 Ma 经历了多期次、长时间的岩浆侵位和结晶分异过程, 热液成矿时间发生在 17~14 Ma 之间。

2 岩相学特征

依据矿物组合以及黑云母、石榴子石、电气石等特征性矿物, 可将错那洞淡色花岗岩分为二云母花岗岩、电气石花岗岩和石榴子石花岗岩。

二云母花岗岩主要呈岩基状产出, 是错那洞淡色花岗岩的主要岩性(图 2b)。矿物组成为斜长石、钾长石、石英、白云母和黑云母, 副矿物主要为独居石、锆石、磷灰石等。岩石具有细-中粒、半自形粒状结构, 板状钾长石、片状白云母和粒状石英共生, 包裹较早形成的黑云母等矿物(图 3d)。白云母为片状, 浅褐色-无色, 弱多色性; 黑云母呈棕褐色-红褐色的片状, 多色性极明显; 斜长石为半自形-自形, 聚片双晶发育; 钾长石发育卡斯巴双晶, 且常包裹较早形成的矿物, 如石英、斜长石、云母等(图 3d)。

电气石花岗岩和石榴子石花岗岩主要以脉体形式侵入二云母花岗岩、变质沉积岩围岩, 或呈囊状赋存于二云母花岗岩中(图 2c)。野外没有观察到电气

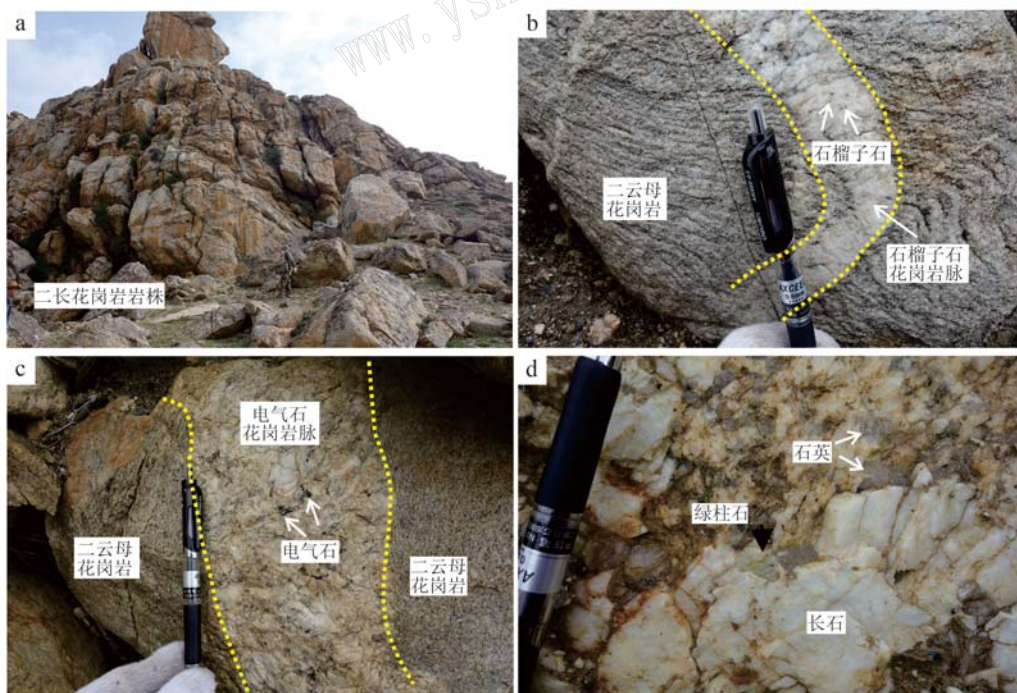


图 2 错那洞淡色花岗岩野外照片

Fig. 2 Outcrop photographs of Cuonadong leucogranite

a—二云母花岗岩岩株; b—石榴子石花岗岩切割变形的二云母花岗岩; c—电气石花岗岩脉切割二云母花岗岩; d—含绿柱石的花岗伟晶岩

a—two-mica granite stock; b—the garnet granite intruded into the two-mica granite; c—the tourmaline granite intruded into the two-mica granite; d—beryl-bearing granite pegmatite

石花岗岩和石榴子石花岗岩之间的切割关系。电气石花岗岩、石榴子石花岗岩均为中细粒花岗结构(图3b、3c),具有相似的矿物成分,石英、斜长石、钾长石、白云母是普遍存在的矿物,但几乎不含黑云母。电气石、石榴子石分别是两类花岗岩代表性的矿物。石榴子石呈粒状,深褐色,内部含有少量石英包裹体。电气石为长柱状或短柱状晶体,横切面呈三角形或多边形,单偏光下具有褐色-深褐色的多色性(图3e、3f)。

花岗伟晶岩呈脉状侵入二云母花岗岩岩株或围岩地层中。与电气石花岗岩不同,花岗伟晶岩主要矿物为粗粒到巨晶的斜长石、石英和钾长石,其次是

体积分数高达10%的电气石。电气石在伟晶岩脉中呈柱状或纤维状集合体(图3g~3i)。

电气石花岗岩、石榴子石花岗岩和花岗伟晶岩,发育有丰富的稀有金属矿物,如绿柱石(图2d)、锡石、黑钨矿、铌钽铁矿、重钽铁矿、含铷长石、含铷云母等矿物(梁维等, 2018; Xie *et al.*, 2020)。二云母花岗岩与大理岩、石榴子石黑云母片岩接触带发育矽卡岩,形成了锡石、白钨矿、硅铍石、羟硅铍石等矿石矿物。前人研究认为,错那洞二云母花岗岩、电气石花岗岩、石榴子石花岗岩与钨锡铍成矿具有密切的成因联系(张林奎等, 2018; 梁维等, 2018; Xie *et al.*, 2020)。

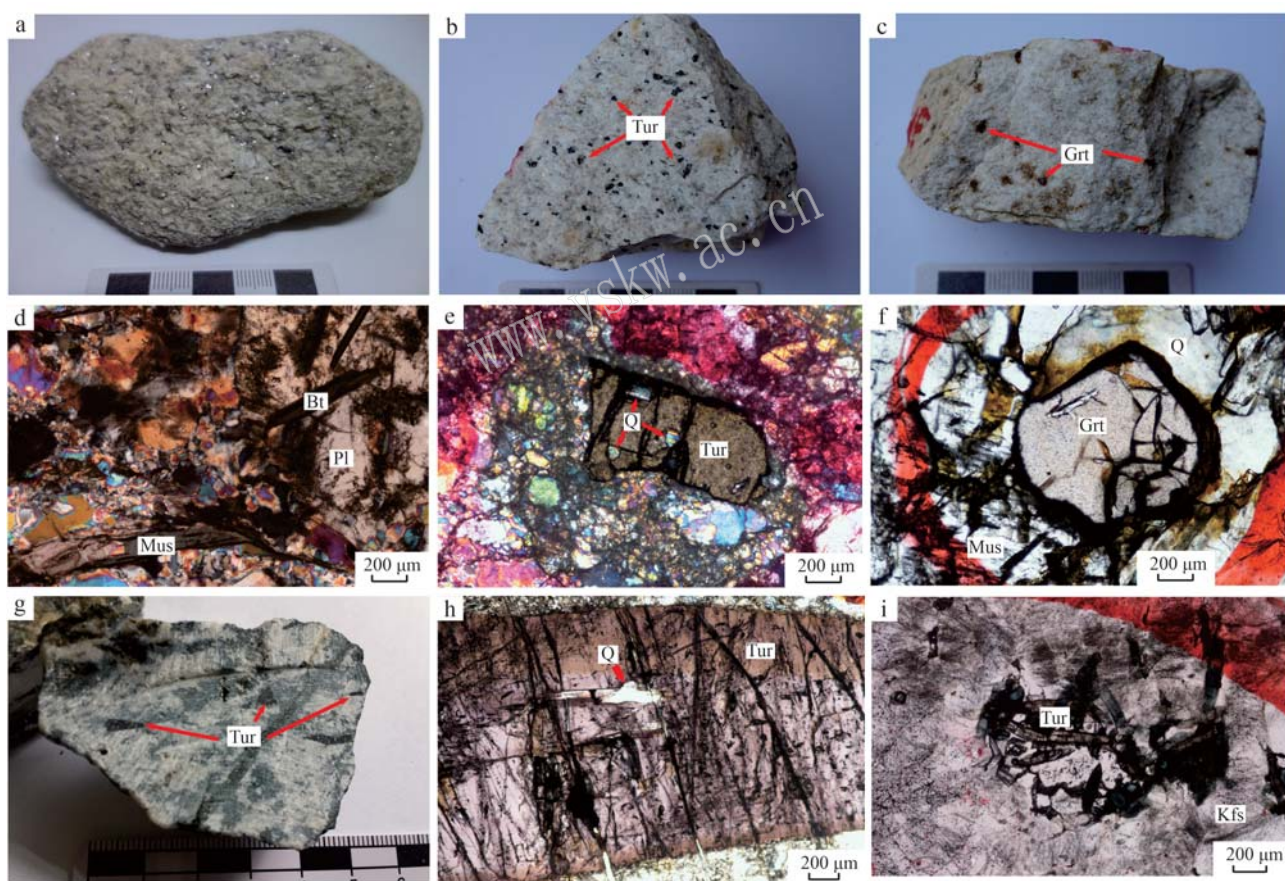


图3 错那洞代表性花岗岩手标本及镜下特征(d、e为正交偏光照片; f、h、i为单偏光照片)

Fig. 3 Hand specimens and microscopic characteristics of representative leucogranites in Cuonadong dome (d and e are microscopic photos under crossed polars; f, h and i are microscopic photos under plain light)

a、d—二云母花岗岩及镜下照片; b、e—电气石花岗岩中的柱状电气石与周围的长石、石英等矿物呈平面或弧形接触; c、f—石榴子石花岗岩及其镜下照片; g、h、i—花岗伟晶岩中的电气石呈柱状或纤维状集合体; Q—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Mus—白云母; Tur—电气石; Grt—石榴子石

a, d—the two-mica granite and its microscopic photo; b, e—the column tourmaline in tourmaline granite occurs with quartz and feldspar and other rock-forming mineral grains with planar or arc-shaped contacts; c, f—garnet granite and its microscopic photo; g, h, i—tourmaline in granitic pegmatite is columnar or fibrous aggregations; Q—quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Mus—muscovite; Tur—tourmaline; Grt—garnet

3 样品及测试方法

本文研究的电气石、云母、长石和石榴子石等样品采自错那洞穹隆中心的二云母花岗岩(10-1A、10-3A、18-7A)、电气石花岗岩(18-17B、18-16C)、石榴子石花岗岩(18-3A、18-3B、18-16B、18-16D)和伟晶岩(10-6A),采样位置如图 1b 所示。将野外采集的样品磨制成薄片探针片,在偏光显微镜下观察矿物的内部结构和包裹关系等。对有代表性的电气石、白云母、黑云母、长石和石榴子石等颗粒开展二次电子图像(SE)和背散射电子图像(BSE)观察,选取颜色均匀且避开裂隙部位进行电子探针成分分析,对具有成分环带的石榴子石,分析其不同部位的成分,共计 192 个分析点。

电子探针二次电子图像(SE)、背散射电子图像(BSE)和微区成分分析分析在西南石油大学地球科学与技术学院电子探针实验室完成。电子探针型号为 JEOL-JXA8230,配备有 4 道波谱仪。在上机测试之前先将样品按照 Zhang 和 Yang(2016)提供的办法

进行镀膜镀上厚度约 20 nm 的碳膜。工作条件为:加速电压 15 kV,加速电流 20 nA,束斑直径 10 μm 。Na、Mg、K、Ca、Fe、Ti、Al、Si、Ni、Cr、Mn 元素特征峰的测量时间为 10 s,上下背景的测量时间分别是峰测量时间的一半。以天然矿物和合成纯氧化物为标准进行校准,使用的国际 SPI 标样为 Na($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、Mg($\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$)、Al($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、Si($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、K(KAlSi_3O_8)、Ca($\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$)、Fe(FeCr_2O_4)、Cr(FeCr_2O_4)、Ti(TiO_2)、Mn($\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$)。

4 分析结果

4.1 长石

错那洞二云母花岗岩、电气石花岗岩、石榴子石花岗岩的碱性长石和斜长石的电子探针数据分析结果见表 1 和表 2。

碱性长石主量元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 含量变化范围分别为 64.07%~65.97%、18.20%~18.71%、15.24%~16.05%、0.46%~1.09% (表 1)。从二云母花岗岩到电气石花岗岩和石榴子石花

表 1 造岩矿物碱性长石的主要元素组成

$w_B/\%$

Table 1 Major element analyses of alkaline feldspar

样品 测点	二云母花岗岩					电气石花岗岩			石榴子石花岗岩			
	10-1A					18-17B			18-16C			
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	A-1	A-2	A-3	A-1	A-2	A-3	A-4
Na_2O	1.09	0.94	0.46	0.95	0.74	0.90	0.84	0.82	0.87	1.03	0.72	0.90
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
K_2O	15.24	15.62	16.05	15.64	15.75	15.60	15.63	16.00	15.78	15.40	16.01	15.89
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.12	0.04	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00
P_2O_5	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.07	0.04	0.02
TiO_2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO_2	65.19	65.44	65.40	65.15	65.55	64.23	65.80	65.09	64.07	64.96	65.57	65.97
Al_2O_3	18.45	18.51	18.43	18.60	18.55	18.35	18.61	18.20	18.34	18.68	18.71	18.69
FeO	0.01	0.07	0.11	0.02	0.00	0.03	0.01	0.03	0.03	0.02	0.06	0.00
MnO	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Cr_2O_3	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.01	0.03	0.04
Total	100.00	100.59	100.49	100.37	100.59	99.26	100.96	100.19	99.11	100.21	101.14	101.50
基于 24 个氧原子数计算(阳离子含量单位为 apfu)												
Si	3.00	3.00	3.01	2.99	3.00	2.99	3.00	3.00	2.99	2.99	3.00	3.00
Al	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	0.99	1.01	1.01	1.01	1.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.10	0.08	0.04	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.09	0.06	0.08
K	0.89	0.91	0.94	0.92	0.92	0.93	0.91	0.94	0.94	0.90	0.93	0.92
长石端员(摩尔分数/%)												
An	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.59	0.19	0.04	0.00	0.18	0.00	0.00
Ab	9.77	8.39	4.16	8.41	6.62	7.98	7.51	7.23	7.75	9.18	6.42	7.91
Or	90.23	91.61	95.84	91.59	93.34	91.43	92.30	92.72	92.25	90.65	93.58	92.09

表 2 造岩矿物斜长石的主要元素组成

Table 2 Major element analyses of plagioclase

 $w_B/\%$

样品	二云母花岗岩												电气石花岗岩												石榴子石花岗岩											
	10-1A						10-3A						18-17B						18-3A																	
	A-1	A-2	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	B-4	C-1	C-2	C-3	C-4	A-1	A-2	A-3	A-4									
测点																																				
Na ₂ O	10.62	10.29	10.33	10.40	10.54	10.53	10.42	10.51	10.42	10.28	10.77	10.73	10.70	11.07	10.82	11.02	11.12	11.46	10.68	10.78	11.10	11.33	10.95	10.85	10.77	10.63	11.10									
MgO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02									
K ₂ O	0.22	0.20	0.15	0.09	0.18	0.19	0.15	0.24	0.27	0.12	0.13	0.22	0.15	0.14	0.11	0.13	0.10	0.10	0.15	0.23	0.17	0.15	0.18	0.24	0.24	0.26	0.25									
CaO	1.86	1.93	2.25	2.19	2.17	2.19	2.31	2.32	2.31	2.30	1.80	1.91	1.71	2.39	1.59	1.21	1.51	0.81	1.40	2.04	1.49	1.54	1.57	1.62	1.73	1.73	1.25									
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.04	0.00	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.78	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.05	0.00	0.06	0.05	0.00	0.03	0.00	0.07									
TiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00									
SiO ₂	66.70	66.37	65.90	66.55	66.03	65.98	66.27	65.57	65.73	66.07	66.74	65.48	66.86	66.28	66.81	68.06	67.15	68.82	68.34	67.52	67.66	67.02	67.60	67.15	67.39	67.14	67.15									
Al ₂ O ₃	21.15	21.30	21.59	21.33	21.38	21.44	21.37	21.08	21.32	21.59	21.09	20.96	21.26	20.17	21.36	21.07	21.04	20.30	21.20	21.54	21.19	21.06	21.07	20.9721	20.21	20.9721	20.21	20.9721								
FeO	0.00	0.07	0.02	0.03	0.00	0.00	0.03	0.04	0.01	0.04	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01									
MnO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00									
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.00	0.02	0.02	0.01	0.07	0.07	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03									
Total	100.59	100.20	100.29	100.62	100.33	100.45	100.62	99.84	100.09	100.45	100.59	99.36	100.79	101.00	100.78	101.54	100.98	101.56	101.80	102.22	101.62	101.21	101.45	100.84	101.39	100.92	100.38									
基于 24 个氧原子数计算(阳离子含量单位为 apfu)																																				
Si	2.91	2.91	2.89	2.90	2.89	2.89	2.90	2.89	2.89	2.89	2.91	2.90	2.91	2.92	2.91	2.94	2.92	2.97	2.94	2.91	2.92	2.91	2.93	2.92	2.92	2.92	2.94									
Al	1.09	1.10	1.12	1.10	1.10	1.11	1.10	1.10	1.11	1.11	1.09	1.09	1.09	1.05	1.10	1.07	1.08	1.03	1.07	1.09	1.08	1.08	1.07	1.08	1.08	1.08	1.06									
Ca	0.09	0.09	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.08	0.09	0.08	0.11	0.07	0.06	0.07	0.04	0.06	0.09	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.06									
Na	0.90	0.87	0.88	0.88	0.90	0.89	0.88	0.90	0.89	0.87	0.91	0.92	0.90	0.95	0.91	0.92	0.94	0.96	0.89	0.90	0.93	0.95	0.92	0.92	0.90	0.90	0.94									
K	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01									
SUM	5.00	4.98	5.00	4.99	5.01	5.01	5.00	5.01	5.01	4.99	5.00	5.02	5.00	5.03	5.00	4.99	5.01	5.00	4.97	5.00	5.01	5.03	5.00	5.00	5.00	4.99	5.01									
斜长石端员(摩尔分数/%)																																				
An	8.7	9.3	10.7	10.4	10.1	10.2	10.8	10.7	10.7	10.9	8.4	8.9	8.0	10.6	7.5	5.7	6.9	3.7	6.7	9.4	6.8	6.9	7.3	7.5	8.1	8.1	5.8									
Ab	90.1	89.6	88.5	89.1	88.9	88.7	88.3	88.0	87.8	88.4	90.9	90.0	91.1	88.7	91.9	93.6	92.5	95.8	92.5	89.4	92.3	92.3	91.7	91.2	90.6	90.4	92.9									
Or	1.2	1.1	0.9	0.5	1.0	1.1	0.8	1.3	1.5	0.7	0.7	1.2	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5	0.9	1.3	0.9	0.8	1.0	1.3	1.3	1.5	1.4									

岗岩,碱性长石端员组分没有显著的趋势性变化,钠长石 Ab 分别为 $Ab_{4.2\sim9.8}$ 、 $Ab_{7.2\sim8.0}$ 、 $Ab_{4.2\sim9.8}$,正长石 Or 分别为 $Or_{90.2\sim95.8}$ 、 $Or_{91.4\sim92.7}$ 、 $Or_{90.7\sim95.8}$,在长石分类图解中,3类花岗岩均分布于正长石的范围内(图4)。

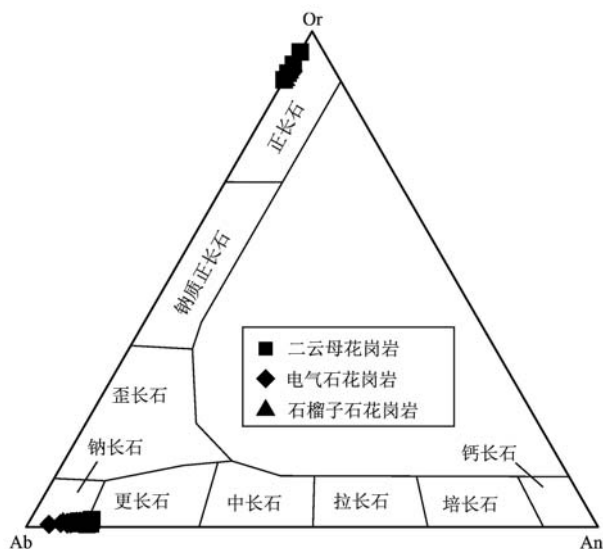


图4 长石化学成分分类图

Fig. 4 Diagram of feldspar classification

An—钙长石; Or—钾长石; Ab—钠长石

An—anorthite; Or—K-feldspar; Ab—albite

斜长石主量元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 含量变化范围分别为 65.48%~68.82%、20.17%~21.59%、0.81%~2.39%、10.28%~11.46%、0.09%~0.27%。3类花岗岩的斜长石均具有富钠长石的特点,钠长石 Ab 端员组分平均值为 90.6。相对于二云母花岗岩斜长石 ($Ab_{87.8\sim90.9}An_{8.4\sim10.9}$),电气石花岗岩和石榴子石花岗岩斜长石的钠长石 Ab 端员组分相对较高,分别为 $Ab_{88.7\sim95.8}$ 和 $Ab_{90.4\sim92.9}$;钙长石 An 端员组分相对较低,分别为 $An_{3.7\sim10.6}$ 、 $An_{5.8\sim7.5}$ (表2)。在长石分类图解中,二云母花岗岩中斜长石大部分落于钠长石区域,少部分处于更长石区域;而晚期的石榴子石花岗岩和电气石花岗岩中斜长石均处于钠长石区域(图4)。

4.2 黑云母

黑云母样品均来自二云母花岗岩。黑云母的阳离子数以 22 个氧为基础进行计算, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 值采用阳离子总数 8、阴离子负电价 23 的理论值计算(林文蔚等, 1994),结果见表 3。

黑云母 $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 值可以指示黑云母未遭受后期流体的改造(向坤等, 2019; Stone, 2000)。

本文黑云母 $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 值集中分布于 0.83~0.88 之间,说明黑云母未遭受后期流体的改造。二云母花岗岩的黑云母具有贫 Mg 富 Fe 的特征,其 FeO 、 MgO 含量分别为 21.67%~27.24%和 1.70%~2.74%,含镁系数 $IMg [IMg = Mg/(Mg+Fe^{2+})]$ 仅为 0.13~0.17。二云母花岗岩的黑云母在 $Mg-(Fe^{3+}+Al^{VI}+Ti)-(Fe^{2+}+Mn)$ 图解(图 5a)中,位于铁叶云母区域,具有过铝质花岗岩黑云母的特征(图 5b)。

4.3 白云母

白云母是错那洞淡色花岗岩中普遍存在的富铝矿物相。本次研究中的白云母样品分别来自二云母花岗岩、电气石花岗岩和石榴子石花岗岩。白云母的电子探针分析结果见表 4。

Miller 等(1981)依据花岗岩中白云母的结构条件,将白云母分为原生型和次生型。原生型白云母比次生型热液蚀变形成的白云母具有更高的 Ti、Na、Al 含量和更低的 Si 和 Mg 含量。在 $Mg-Ti-Na$ 三元图解当中,错那洞 3 类淡色花岗岩样品的白云母均落在原生白云母区域(图 6),属于岩浆成因白云母。

3 类花岗岩白云母的 SiO_2 、 K_2O 含量相近,集中分布于 45.21%~47.37%、9.80%~10.95%之间。从二云母花岗岩到电气石花岗岩和石榴子石花岗岩,白云母具有弱的富集 Al、Na 等元素的趋势,其 Al_2O_3 平均含量分别为 31.19%、33.26%、32.69%, Na_2O 平均含量分别为 0.37%、0.41%、0.43%。与黑云母类似,从二云母花岗岩到电气石花岗岩和石榴子石花岗岩,白云母 FeO 、 MgO 含量具有总体逐渐降低的趋势,相对而言具有富 Fe 贫 Mg 的趋势, FeO 平均含量分别为 4.20%、3.52%和 3.73%, MgO 平均含量分别为 0.9%、0.45%和 0.46%。 X_{Fe} 值 [$X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg)$] 分别在 0.71~0.74、0.78~0.85 和 0.80~0.88 之间。

4.4 电气石

电气石是高分异花岗岩的标志性矿物之一(吴福元等, 2017),常在电气石花岗岩中出现,均呈黑色的长柱状产出(图 3e)。电气石在伟晶岩中出现多为长柱状或块状电气石集合体(图 3g)。电气石化学通式为 $XY_3Z_6[T_6O_{18}][BO_3]_3V_3W$,其中 $X = Na^+$, Ca^{2+} , K^+ , 空位; $Y = Fe^{2+}$, Mg^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Li^+ , Fe^{3+} , Cr^{3+} ; $Z = Al^{3+}$, Mg^{2+} , Fe^{3+} 和 Cr^{3+} ; $T = Si^{4+}$, Al^{3+} 和 B^{3+} ; $V+W = OH^-$, O^{2-} , F^- 。电气石的晶体化学式根据 Henry 等(2011)提出的四面体和八面体

表 3 造岩矿物黑云母的主要元素组成
Table 3 Major element analyses of biotite

样品	二云母花岗岩						二云母花岗岩						二云母花岗岩			
	18-7A						10-1A						10-3A			
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	A-1	A-2	B-1	C-1	
测点																
SiO ₂	34.59	34.16	33.93	34.17	34.70	34.08	36.55	36.08	35.83	36.73	36.84	36.21	36.37	36.05	36.48	
TiO ₂	1.66	1.57	1.45	1.50	1.26	1.98	1.86	1.87	2.13	2.08	2.16	2.26	2.40	2.24	2.21	
Al ₂ O ₃	19.06	19.01	19.02	18.53	19.90	19.14	20.69	20.23	20.22	20.73	20.66	20.38	20.43	20.06	20.46	
FeO ^T	26.57	26.63	26.70	27.24	25.97	25.22	22.28	22.87	23.04	22.12	21.67	22.64	23.18	23.99	22.27	
MnO	0.36	0.37	0.40	0.38	0.41	0.38	0.70	0.69	0.63	0.64	0.61	0.65	0.65	0.63	0.65	
MgO	2.73	2.69	2.74	2.70	2.48	2.64	1.80	1.79	1.82	1.74	1.76	1.70	1.76	1.82	1.78	
CaO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	
Na ₂ O	0.14	0.18	0.09	0.10	0.10	0.15	0.19	0.24	0.21	0.20	0.15	0.27	0.26	0.32	0.19	
K ₂ O	9.27	9.38	9.26	9.15	9.00	9.53	9.30	9.45	9.39	9.44	8.78	9.26	9.39	9.35	9.42	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.19	0.20	0.58	0.00	0.11	0.34	0.27	0.00	
Cl	0.09	0.10	0.09	0.07	0.11	0.07	0.04	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	0.02	0.03	0.03	
Cr ₂ O ₃	0.15	0.10	0.07	0.18	0.18	0.11	0.02	0.01	0.07	0.03	0.06	0.23	0.18	0.20	0.23	
Li ₂ O [*]	0.38	0.25	0.18	0.25	0.41	0.23	0.94	0.80	0.73	0.99	1.02	0.84	0.89	0.79	0.92	
H ₂ O [*]	3.77	3.73	3.71	3.72	3.77	3.72	3.67	3.75	3.75	3.62	3.88	3.82	3.74	3.75	3.88	
O=F,Cl	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.18	0.09	0.08	0.25	0.01	0.05	0.15	0.12	0.01	
Total	98.74	98.14	97.62	97.99	98.26	97.22	98.27	97.89	97.93	98.68	97.63	98.32	99.46	99.37	98.51	
Fe ₂ O ₃	2.82	2.68	2.69	2.74	2.96	2.75	3.03	3.00	3.02	3.03	3.06	3.04	3.08	3.07	3.03	
FeO	24.03	24.22	24.27	24.78	23.31	22.74	19.56	20.16	20.32	19.40	18.92	19.90	20.41	21.23	19.54	
基于 22 个氧原子数计算 (阳离子含量单位为 apfu)																
Si	5.48	5.46	5.45	5.48	5.49	5.47	5.65	5.63	5.60	5.65	5.68	5.61	5.59	5.57	5.63	
Al ^{IV}	2.52	2.54	2.55	2.52	2.51	2.53	2.35	2.37	2.40	2.35	2.32	2.39	2.41	2.43	2.37	
Al ^{VI}	1.03	1.04	1.06	0.98	1.20	1.09	1.41	1.35	1.32	1.40	1.44	1.33	1.28	1.23	1.35	
Ti	0.20	0.19	0.18	0.18	0.15	0.24	0.22	0.22	0.25	0.24	0.25	0.26	0.28	0.26	0.26	
Cr	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	
Fe ²⁺	3.18	3.23	3.25	3.32	3.08	3.04	2.54	2.64	2.66	2.51	2.46	2.59	2.64	2.76	2.54	
Fe ³⁺	0.34	0.32	0.32	0.33	0.35	0.33	0.35	0.35	0.36	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	
Mn	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	
Mg	0.64	0.64	0.66	0.65	0.58	0.63	0.41	0.42	0.42	0.40	0.40	0.39	0.40	0.42	0.41	
Li [*]	0.24	0.16	0.12	0.16	0.26	0.15	0.58	0.50	0.46	0.61	0.63	0.52	0.55	0.49	0.57	
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Na	0.04	0.06	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.04	0.08	0.08	0.10	0.06	
K	1.87	1.91	1.90	1.87	1.82	1.95	1.83	1.88	1.87	1.85	1.73	1.83	1.84	1.84	1.85	
OH [*]	3.98	3.97	3.97	3.98	3.97	3.98	3.79	3.90	3.90	3.71	3.99	3.95	3.83	3.86	3.99	
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.10	0.10	0.28	0.00	0.05	0.17	0.13	0.00	
Cl	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	
SUM	19.61	19.61	19.57	19.60	19.55	19.54	19.50	19.53	19.50	19.51	19.41	19.49	19.53	19.56	19.50	
X _{Fe}	0.85	0.85	0.84	0.85	0.85	0.84	0.87	0.88	0.88	0.88	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	

$X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg)$, * 表示其为计算数据。

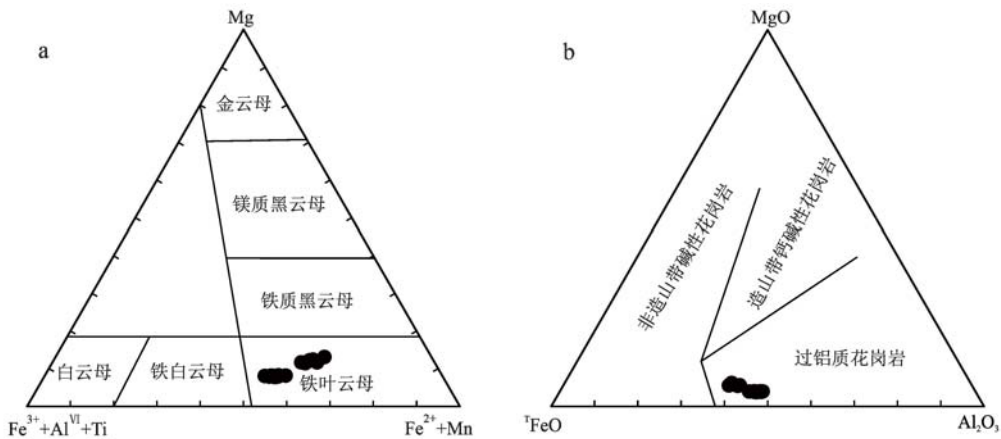


图 5 错那洞二云母花岗岩中黑云母分类图[a, 底图据 Foster(1960 修改)]及构造环境判别图 [b, 底图据 Abdel-Rahman(1994)修改]
Fig. 5 Classification of biotite(a, after Foster, 1960) and discrimination diagram of tectonic settings for biotite (b, after Abdel-Rahman, 1994)

表 4 造岩矿物白云母的主要元素组成
Table 4 Major element analyses of muscovite

w_B/%

样品 样号 测点	二云母花岗岩 10-3A								电气石花岗岩 18-17B									
	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	B-4	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	C-1
SiO ₂	46.55	45.37	45.69	46.33	46.23	46.54	46.11	46.30	46.15	46.36	45.87	46.22	46.82	46.28	46.39	46.14	46.09	45.83
TiO ₂	0.47	0.54	0.52	0.41	0.41	0.46	0.38	0.43	0.25	0.28	0.18	0.73	0.56	0.25	0.89	0.99	0.14	0.17
Al ₂ O ₃	31.17	31.94	31.81	31.04	30.63	31.00	31.02	30.89	32.92	33.67	33.17	33.31	33.36	33.06	33.88	33.16	33.32	32.36
FeO	4.37	4.08	3.89	4.20	4.30	4.39	4.21	4.20	3.80	3.46	3.56	3.45	3.67	3.36	2.81	3.11	3.41	4.00
MnO	0.13	0.08	0.10	0.11	0.12	0.13	0.13	0.10	0.11	0.06	0.10	0.09	0.10	0.09	0.06	0.07	0.07	0.12
MgO	0.96	0.79	0.76	0.85	0.96	0.96	0.99	0.92	0.43	0.35	0.43	0.39	0.42	0.42	0.45	0.45	0.39	0.55
CaO	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.06
Na ₂ O	0.35	0.43	0.35	0.35	0.41	0.36	0.37	0.36	0.36	0.43	0.33	0.43	0.36	0.43	0.50	0.48	0.43	0.42
K ₂ O	10.64	10.57	10.71	10.42	10.58	10.62	10.61	10.82	10.91	10.95	10.58	10.84	10.88	10.86	10.68	10.80	10.61	10.72
F	0.90	0.71	0.63	0.68	0.81	0.87	0.66	0.73	0.82	0.85	0.81	0.83	0.83	0.88	0.89	0.70	0.73	0.78
Cl	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02	0.05	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.05
Li ₂ O*	0.20	0.14	0.12	0.14	0.18	0.19	0.13	0.15	0.18	0.19	0.18	0.18	0.18	0.20	0.20	0.14	0.15	0.17
H ₂ O*	3.98	4.03	4.07	4.04	3.97	3.98	4.05	4.03	4.04	4.07	4.02	4.07	4.10	4.01	4.07	4.12	4.07	4.01
O=F,Cl	0.38	0.30	0.27	0.29	0.34	0.37	0.28	0.31	0.35	0.36	0.35	0.35	0.35	0.37	0.38	0.30	0.31	0.33
Total	99.35	98.46	98.37	98.33	98.27	99.13	98.40	98.64	99.67	100.32	98.97	100.21	101.00	99.48	100.45	99.88	99.13	98.91
基于 11 个氧原子数计算(阳离子含量单位为 apfu)																		
Si	6.33	6.23	6.27	6.36	6.36	6.35	6.33	6.35	6.25	6.22	6.24	6.21	6.24	6.26	6.19	6.21	6.25	6.26
Al ^{IV}	1.67	1.77	1.73	1.64	1.64	1.65	1.67	1.65	1.75	1.78	1.76	1.79	1.76	1.74	1.81	1.79	1.75	1.74
Al ^{VI}	3.34	3.40	3.42	3.38	3.33	3.33	3.36	3.34	3.50	3.55	3.55	3.49	3.49	3.53	3.52	3.48	3.57	3.47
Ti	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.07	0.06	0.02	0.09	0.10	0.01	0.02
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe	0.50	0.47	0.45	0.48	0.50	0.50	0.48	0.48	0.43	0.39	0.40	0.39	0.41	0.38	0.31	0.35	0.39	0.46
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.20	0.16	0.15	0.17	0.20	0.19	0.20	0.19	0.09	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.11
Li	0.11	0.08	0.07	0.08	0.10	0.11	0.07	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.11	0.08	0.08	0.09
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Na	0.09	0.11	0.09	0.09	0.11	0.09	0.10	0.10	0.09	0.11	0.09	0.11	0.09	0.11	0.13	0.13	0.11	0.11
K	1.85	1.85	1.88	1.82	1.86	1.85	1.86	1.89	1.88	1.87	1.83	1.86	1.85	1.87	1.82	1.85	1.84	1.87
OH	3.61	3.69	3.73	3.70	3.65	3.62	3.72	3.68	3.65	3.64	3.65	3.65	3.65	3.62	3.62	3.70	3.68	3.66
F	0.39	0.31	0.27	0.30	0.35	0.37	0.28	0.32	0.35	0.36	0.35	0.35	0.35	0.37	0.37	0.30	0.31	0.34
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
SUM	18.14	18.15	18.12	18.09	18.14	18.14	18.13	18.14	18.14	18.13	18.10	18.11	18.10	18.14	18.08	18.08	18.09	18.15
X _{Fe}	0.72	0.74	0.74	0.74	0.72	0.72	0.71	0.72	0.83	0.85	0.82	0.83	0.83	0.82	0.78	0.79	0.83	0.80
X _{Mn}	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03

X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg); X_{Mn} = Mn/(Mn+Fe); * 表示其为计算数据。

续表 4
Continued Table 4

样品	电气石花岗岩			石榴子石花岗岩														
样号	18-17B			18-16C										18-3A				
测点	C-2	C-3	C-4	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-3	B-4	C-1	C-2	A-1	A-2	A-3	A-4
SiO ₂	46.68	46.45	46.18	46.11	46.29	45.21	45.36	45.81	45.81	46.40	45.87	46.02	45.28	45.45	46.75	47.37	46.23	46.37
TiO ₂	0.55	0.30	0.24	0.37	0.36	0.68	0.60	0.63	0.31	0.24	0.33	0.88	0.79	0.21	0.04	0.08	0.06	0.09
Al ₂ O ₃	33.58	33.47	33.06	32.35	32.56	32.29	32.62	32.81	32.85	33.35	31.33	32.90	32.52	32.05	33.40	33.55	32.68	33.13
FeO	3.87	3.41	3.89	4.14	3.77	3.42	3.17	3.63	3.61	3.45	4.24	3.53	3.48	3.75	4.00	4.14	3.66	3.99
MnO	0.08	0.09	0.10	0.14	0.08	0.11	0.07	0.10	0.12	0.09	0.11	0.08	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.04
MgO	0.53	0.48	0.55	0.51	0.54	0.49	0.42	0.48	0.52	0.46	0.61	0.49	0.47	0.53	0.35	0.40	0.38	0.31
CaO	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.21	0.13	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01
Na ₂ O	0.42	0.33	0.41	0.37	0.35	0.40	0.55	0.53	0.50	0.41	0.33	0.49	0.49	0.42	0.38	0.41	0.47	0.40
K ₂ O	10.59	10.74	10.91	10.81	10.66	10.67	9.80	10.70	10.73	10.71	10.77	10.49	10.63	10.69	10.49	10.27	10.52	10.56
F	0.95	0.82	0.80	0.70	0.65	0.74	0.71	0.77	0.81	0.68	0.78	0.84	0.72	0.68	0.75	0.83	0.67	0.73
Cl	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.10	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.03	0.05	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.07	0.04	0.04	0.04
Li ₂ O*	0.22	0.18	0.17	0.14	0.12	0.15	0.14	0.16	0.18	0.13	0.17	0.19	0.15	0.14	0.16	0.18	0.13	0.15
H ₂ O*	4.05	4.07	4.06	4.08	4.11	4.01	4.00	4.05	4.02	4.12	3.98	4.04	4.03	4.02	4.11	4.12	4.08	4.09
O=F,Cl	0.40	0.35	0.34	0.30	0.27	0.31	0.32	0.33	0.35	0.29	0.33	0.36	0.30	0.29	0.32	0.35	0.29	0.31
Total	101.14	100.02	100.06	99.47	99.24	98.10	97.40	99.38	99.16	99.78	98.22	99.62	98.37	97.76	100.29	101.12	98.76	99.59
基于 11 个氧原子数计算(阳离子含量单位为 apfu)																		
Si	6.21	6.24	6.23	6.27	6.28	6.22	6.24	6.22	6.23	6.25	6.32	6.22	6.21	6.27	6.27	6.29	6.30	6.27
Al ^{IV}	1.79	1.76	1.77	1.73	1.72	1.78	1.76	1.78	1.77	1.75	1.68	1.78	1.79	1.73	1.73	1.71	1.70	1.73
Al ^{VI}	3.48	3.54	3.49	3.45	3.49	3.45	3.53	3.46	3.50	3.55	3.40	3.46	3.46	3.49	3.55	3.54	3.54	3.55
Ti	0.06	0.03	0.02	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.03	0.02	0.03	0.09	0.08	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe	0.43	0.38	0.44	0.47	0.43	0.39	0.36	0.41	0.41	0.39	0.49	0.40	0.40	0.43	0.45	0.46	0.42	0.45
Mn	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11	0.10	0.09	0.10	0.11	0.09	0.13	0.10	0.10	0.11	0.07	0.08	0.08	0.06
Li	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08	0.09	0.10	0.07	0.09	0.10	0.08	0.08	0.08	0.10	0.07	0.08
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.11	0.09	0.11	0.10	0.09	0.11	0.15	0.14	0.13	0.11	0.09	0.13	0.13	0.11	0.10	0.11	0.12	0.11
K	1.80	1.84	1.88	1.87	1.85	1.87	1.72	1.85	1.86	1.84	1.89	1.81	1.86	1.88	1.79	1.74	1.83	1.82
OH	3.60	3.65	3.66	3.70	3.72	3.67	3.67	3.66	3.64	3.71	3.66	3.64	3.69	3.70	3.68	3.65	3.71	3.69
F	0.40	0.35	0.34	0.30	0.28	0.32	0.31	0.33	0.35	0.29	0.34	0.36	0.31	0.30	0.32	0.35	0.29	0.31
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUM	18.11	18.09	18.15	18.13	18.08	18.13	18.02	18.14	18.15	18.09	18.14	18.09	18.12	18.13	18.07	18.04	18.08	18.09
X _{Fe}	0.80	0.80	0.80	0.82	0.80	0.80	0.81	0.81	0.80	0.81	0.80	0.80	0.81	0.80	0.87	0.85	0.84	0.88
X _{Mn}	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01

位置(X+Y+Z)上有 15 个阳离子和 31 个阴离子计算得到,B₂O₃ 和 H₂O 的值是根据 OH+F=4 和 B=3 计算所得。具体计算方法参考 Zhou 等(2019),电气石电子探针数据及晶体化学式计算结果详见表 5。

花岗岩型电气石主量元素 SiO₂、Al₂O₃、FeO、MgO、CaO、MnO、Na₂O、TiO₂ 含量变化范围为 33.82%~35.40%、30.69%~32.62%、14.31%~15.10%、1.21%~1.68%、0.18%~0.31%、0.16%~0.27%、2.04%~2.38%、0.14%~0.81%,Cr₂O₃ 和 K₂O 的含量几乎可以忽略不计(<0.1%)。伟晶岩型电气石主量元素 SiO₂、Al₂O₃、FeO、MgO、CaO、MnO、Na₂O 含量变化范围为 34.23%~35.55%、30.32%~

33.72%、14.33%~15.86%、0.34%~2.36%、0.20%~0.85%、0.24%~0.52%、1.94%~2.08%,TiO₂、Cr₂O₃ 和 K₂O 等含量小于 0.1%或低于检测限。电气石花岗岩和花岗伟晶岩中电气石均属于碱基组电气石(图 7)。花岗岩型电气石和伟晶岩电气石均属于富 Fe 贫 Mg 的黑电气石(图 8a)。

4.5 石榴子石

石榴子石通常存在于含石榴子石的白云母花岗岩当中,其自形-半自形的结构特征表明其是由岩浆直接结晶形成的。石榴子石晶体化学式以 18 个氧为基础进行计算,电子探针数据及晶体化学式计算结果详见表 6。

表 5 造岩矿物电气石的主要元素组成
Table 5 Major element analyses of tourmaline

$w_B/\%$

样品	电气石花岗岩														花岗伟晶岩													
	18-16C														10-6A													
	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	C-1	C-2	C-3	C-4	D-1	D-2	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	B-1	B-2	B-3	B-4	C-1	C-2	C-3			
测点	SiO ₂	35.40	34.88	34.83	33.82	35.10	34.45	35.19	35.40	34.37	35.13	35.17	34.05	35.30	35.40	34.40	34.31	34.57	34.23	34.72	35.55	35.36	35.14	34.65	35.33	34.29		
	TiO ₂	0.33	0.14	0.44	0.81	0.38	0.40	0.46	0.46	0.55	0.32	0.60	0.74	0.43	0.28	0.24	0.21	0.34	0.50	0.37	0.10	0.15	0.43	0.44	0.42	0.13		
	Al ₂ O ₃	32.62	32.07	32.09	30.69	32.18	30.79	31.43	32.34	31.44	32.33	32.21	30.94	32.08	30.75	30.32	32.53	32.87	32.47	32.98	32.85	33.32	32.15	31.56	32.13	33.72		
	Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00		
	FeO	14.40	14.32	14.96	15.10	14.31	14.38	14.85	14.37	14.57	14.46	14.66	14.86	15.73	14.43	14.76	15.55	14.74	14.87	15.37	14.69	14.76	15.24	15.61	15.86	14.33		
	MgO	1.38	1.68	1.30	1.46	1.50	1.66	1.59	1.55	1.22	1.57	1.21	1.57	0.66	2.33	2.36	0.34	0.44	0.92	0.54	0.63	0.61	0.49	0.48	0.39	0.45		
	CaO	0.21	0.23	0.23	0.26	0.25	0.31	0.24	0.24	0.18	0.30	0.23	0.30	0.33	0.40	0.85	0.38	0.36	0.39	0.36	0.25	0.20	0.28	0.34	0.33	0.29		
	MnO	0.23	0.22	0.21	0.17	0.23	0.25	0.27	0.25	0.27	0.25	0.16	0.19	0.41	0.24	0.33	0.52	0.45	0.42	0.49	0.40	0.43	0.45	0.41	0.43	0.43		
	Na ₂ O	2.19	2.24	2.20	2.26	2.10	2.38	2.23	2.07	2.16	2.21	2.04	2.28	2.06	2.01	1.94	1.99	2.06	2.05	1.94	1.97	2.05	1.94	2.08	1.96	1.97		
	K ₂ O	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.07	0.04	0.04	0.04		
	H ₂ O [*]	3.58	3.53	3.54	3.45	3.55	3.47	3.54	3.57	3.48	3.56	3.55	3.47	3.56	3.52	3.47	3.51	3.53	3.52	3.48	3.56	3.51	3.53	3.43	3.55	3.53		
	B ₂ O ₃	10.37	10.23	10.25	10.00	10.28	10.07	10.25	10.36	10.09	10.33	10.30	10.06	10.31	10.22	10.07	10.16	10.23	10.19	10.30	10.34	10.38	10.25	10.14	10.30	10.23		
	Li ₂ O [*]	0.28	0.21	0.22	0.19	0.25	0.28	0.23	0.24	0.25	0.25	0.28	0.21	0.27	0.18	0.11	0.23	0.34	0.23	0.23	0.33	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29		
Total		101.07	99.82	100.35	98.27	100.18	98.50	100.33	100.90	98.61	100.79	100.50	98.74	101.19	99.80	98.93	99.78	99.97	99.87	100.98	100.73	101.26	100.27	99.64	101.05	99.71		
基于 31 个阴离子(氧、氢、氟)的结构式																												
B	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
T 位	5.93	5.93	5.90	5.88	5.93	5.95	5.96	5.94	5.92	5.91	5.93	5.88	5.95	6.02	5.94	5.87	5.87	5.84	5.86	5.98	5.92	5.96	5.94	5.96	5.82	5.82		
Si	0.07	0.07	0.10	0.12	0.07	0.05	0.04	0.06	0.08	0.09	0.07	0.12	0.05	0.00	0.06	0.13	0.13	0.16	0.14	0.02	0.08	0.04	0.06	0.04	0.18	0.18		
Al	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Y 位	0.37	0.35	0.31	0.17	0.35	0.21	0.24	0.34	0.31	0.33	0.34	0.18	0.32	0.16	0.10	0.43	0.45	0.36	0.42	0.48	0.50	0.38	0.32	0.35	0.57	0.57		
Al	0.04	0.02	0.06	0.11	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.04	0.08	0.10	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.06	0.05	0.01	0.02	0.06	0.06	0.05	0.02	0.02		
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Mg	0.35	0.42	0.33	0.38	0.38	0.43	0.40	0.39	0.31	0.39	0.31	0.40	0.16	0.59	0.61	0.09	0.11	0.23	0.14	0.16	0.15	0.12	0.12	0.10	0.11	0.11		
Mn	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.06	0.03	0.05	0.08	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06		
Fe ²⁺	2.02	2.03	2.12	2.19	2.02	2.08	2.11	2.02	2.10	2.04	2.07	2.15	2.22	2.05	2.13	2.22	2.09	2.12	2.17	2.07	2.07	2.16	2.24	2.24	2.04	2.04		
Li [*]	0.19	0.14	0.15	0.13	0.17	0.19	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.19	0.14	0.19	0.13	0.08	0.16	0.23	0.16	0.15	0.22	0.20	0.20	0.19	0.20	0.20		
Σ Y	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		
X 位	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.06	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.06	0.06	0.07	0.16	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05		
Ca	0.71	0.74	0.72	0.76	0.69	0.80	0.73	0.67	0.72	0.72	0.67	0.76	0.67	0.66	0.65	0.66	0.68	0.68	0.64	0.64	0.64	0.67	0.64	0.69	0.64	0.65		
Na	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
K	0.24	0.21	0.22	0.17	0.26	0.13	0.21	0.27	0.24	0.20	0.27	0.17	0.25	0.26	0.18	0.26	0.25	0.24	0.29	0.31	0.29	0.30	0.23	0.29	0.29	0.29		
X _{Vacancy}	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
OH/F	0.91	0.90	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.96	0.86	0.86	0.98	0.97	0.94	0.97	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.97		
Fe [#]	0.91	0.90	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.96	0.86	0.86	0.98	0.97	0.94	0.97	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98	0.97		

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；Li₂O 按 Li = [15 - (T + Z + Y)] 计算；Fe[#] = FeO / (FeO + MgO)；* 代表计算值。

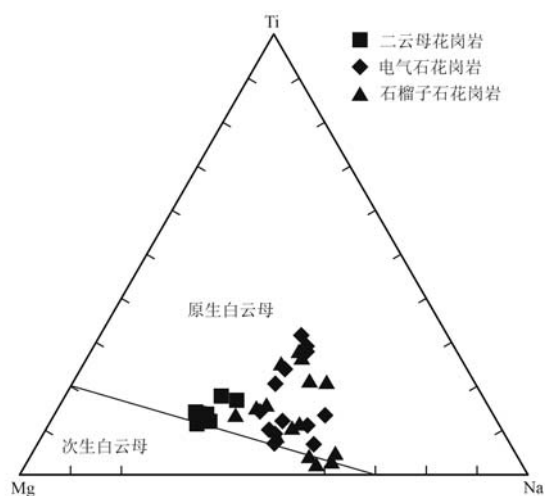


图6 淡色花岗岩中白云母 Mg-Ti-Na 图
(原生白云母和次生白云母区域据 Miller 等, 1981)
Fig. 6 Ternary Mg-Ti-Na diagram for muscovites from leucogranites (the primary and secondary muscovite fields are from Miller *et al.*, 1981)

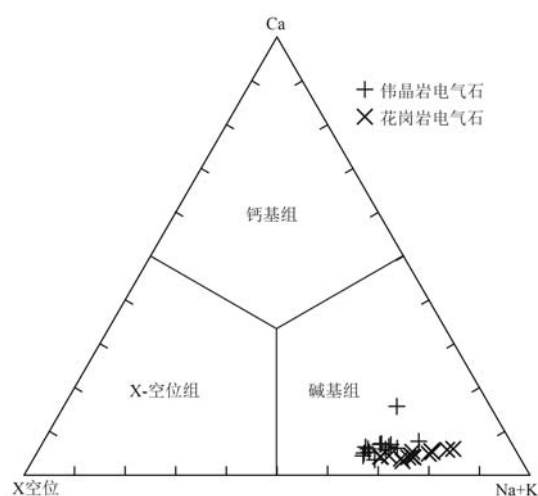


图7 错那洞电气石花岗岩中电气石类别划分图
(据 Henry 和 Dutrow, 2011)
Fig. 7 Classification for the tourmalines of tourmaline granite from Cuonadong (after Henry and Dutrow, 2011)

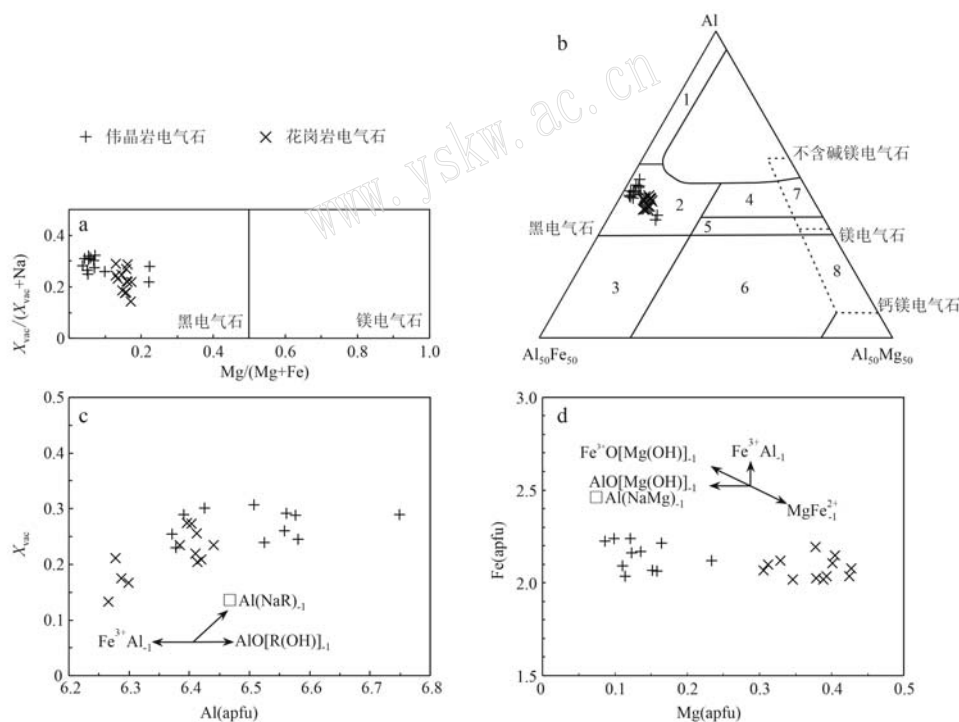


图8 电气石种类分类图[a,底图据 Henry 和 Dutrow (2012)修改]、Al-Fe-Mg 三元图解[b,底图据 Henry 和 Guidotti (1985)]、 X_{vac} -Al 关系图(c)和 Fe-Mg 关系图(d)

Fig. 8 Classifications diagrams for tourmaline species (a, from Henry and Dutrow, 2012), ternary Al-Fe-Mg plot (b, from Henry and Guidotti, 1985), X_{vac} -Al (c) and Fe-Mg (d) diagrams

b 中: 1—富锂花岗质伟晶岩和细晶岩; 2—贫锂花岗岩、伟晶岩和细晶岩; 3—富 Fe^{3+} 的石英电气石蚀变花岗岩类; 4—含铝饱和相的变泥质岩和变砂屑岩; 5—缺乏铝饱和相的变泥质岩和变砂屑岩; 6—富 Fe^{3+} 的石英电气石岩、钙硅酸盐岩和变质泥质岩; 7—低钙变质超镁铁质岩石和富铬钒变质沉积物; 8—变碳酸盐岩和变辉石岩; c 和 d 中: $AlO[R(OH)]_{-1}$ 、 $\square Al(NaR)_{-1}$ 和其他矢量数据来自 Dutrow 和 Henry (2012); apfu—单位分子式中原子的含量

in b: 1—Li-rich granitoid pegmatites and aplites; 2—Li-poor granitoids, pegmatites and aplites; 3— Fe^{3+} -rich quartz tourmaline rocks altered granitoids; 4—metapelites and metapsammities with Al-saturating phase; 5—metapelites and metapsammities lacking Al-saturating phase; 6— Fe^{3+} -rich quartz tourmaline rocks, calc-silicate rocks and metapelites; 7—low-Ca metaultramafic rocks and Cr-V-rich metasediments; 8—metacarbonates and metapyroxenites; in c and d: the operations of $AlO[R(OH)]_{-1}$ 、 $\square Al(NaR)_{-1}$ and other vectors are from Dutrow and Henry, 2012; apfu—atoms per formula unit

表 6 造岩矿物石榴子石的主要元素组成

Table 6 Major element analyses of garnet

石榴子石花岗岩																											
18-3A																											
位置	边					核					边					核					边						
测点	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	D-1	D-2	D-3	
Na ₂ O	0.00	0.06	0.01	0.03	0.03	0.00	0.03	0.05	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.03	0.02	0.07	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	
MgO	0.15	0.15	0.15	0.13	0.10	0.13	0.14	0.14	0.16	0.13	0.17	0.15	0.12	0.15	0.17	0.14	0.16	0.11	0.10	0.09	0.11	0.16	0.13	0.14	0.16	0.16	
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	
CaO	1.28	1.34	1.36	1.36	1.24	1.26	1.25	1.21	1.17	1.16	1.34	1.29	1.40	1.22	1.09	1.25	1.25	1.43	1.45	1.30	1.18	1.29	1.25	1.23	1.26	1.26	
TiO ₂	0.00	0.03	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.02	0.06	0.02	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00	
SiO ₂	37.05	36.70	36.27	35.91	36.18	36.50	36.43	36.71	36.31	36.81	36.61	36.58	36.42	36.18	36.16	36.61	36.67	36.52	36.56	34.90	36.69	36.50	36.54	36.74	36.81	36.47	
Al ₂ O ₃	20.77	20.57	20.39	20.33	20.25	20.34	20.54	20.65	20.33	20.70	20.49	20.58	20.21	20.37	20.22	20.46	20.63	20.43	20.40	19.59	20.30	20.37	20.43	20.74	20.54	20.67	
FeO	28.58	28.56	28.33	29.25	28.58	27.67	28.43	28.49	29.64	31.32	30.91	29.03	29.28	31.28	32.28	30.44	28.83	29.61	29.15	28.82	29.32	29.39	29.81	31.45	29.85	30.40	
MnO	13.36	13.75	13.44	12.57	13.02	13.83	13.30	13.40	12.48	11.25	11.12	12.85	12.68	10.68	9.86	11.60	13.38	12.49	12.76	12.74	12.47	12.32	12.44	11.16	12.13	12.14	
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	
Total	101.20	101.16	99.97	99.59	99.44	99.74	100.15	100.66	100.09	101.40	100.69	100.49	100.15	99.89	99.86	100.59	100.95	100.65	100.44	97.51	100.11	100.07	100.64	101.50	100.82	101.10	
基于 24 个氧原子数计算(阳离子含量单位为 apfu)																											
Si	3.01	2.99	2.99	2.98	3.00	3.00	3.01	3.00	3.00	2.99	2.99	3.00	3.00	3.00	2.99	2.99	3.00	2.99	3.00	2.96	3.02	3.00	3.00	2.99	3.01	2.98	
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Al	1.99	1.98	1.98	1.99	1.98	1.98	1.99	1.99	1.97	1.98	1.98	1.98	1.99	1.96	1.98	1.97	1.98	1.99	1.97	1.97	1.96	1.97	1.98	1.97	1.99	1.98	1.99
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe ³⁺	0.00	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.06	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	
Fe ²⁺	1.94	1.92	1.93	2.00	1.96	1.89	1.95	1.94	2.01	2.11	2.09	1.98	1.98	2.14	2.20	2.06	1.95	2.00	1.97	1.99	2.00	2.00	2.01	2.12	2.02	2.05	
Mn	0.92	0.95	0.94	0.88	0.91	0.97	0.93	0.93	0.87	0.78	0.77	0.89	0.88	0.75	0.69	0.81	0.93	0.87	0.89	0.92	0.87	0.86	0.86	0.77	0.84	0.84	
Mg	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	
Ca	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.12	0.11	0.12	0.11	0.10	0.11	0.11	0.13	0.13	0.12	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	
石榴子石端员(摩尔分数/%)																											
Pyr	0.62	0.59	0.59	0.54	0.40	0.51	0.59	0.55	0.63	0.51	0.70	0.62	0.47	0.60	0.70	0.58	0.65	0.44	0.40	0.38	0.44	0.66	0.54	0.58	0.65	0.64	
Spe	30.76	31.59	31.22	29.23	30.50	32.35	30.87	31.01	28.97	25.80	25.68	29.73	29.47	24.82	22.96	26.86	30.79	28.86	29.56	30.21	29.14	28.67	28.76	25.50	28.05	27.79	
Gro	3.55	2.56	2.81	2.61	2.68	3.01	3.18	3.27	1.94	2.43	2.71	3.13	2.20	2.40	1.47	2.57	2.73	2.67	2.91	0.88	2.44	2.74	2.20	2.54	2.81	2.44	
Alm	64.89	63.91	64.20	66.24	65.42	63.41	64.89	64.91	66.96	70.33	69.70	65.87	65.95	71.00	73.13	68.88	64.93	66.53	65.78	65.50	66.94	66.87	67.04	70.36	67.62	67.92	
X _{Fe}	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	
X _{Mn}	0.32	0.33	0.32	0.30	0.32	0.34	0.32	0.32	0.30	0.27	0.27	0.31	0.30	0.26	0.24	0.28	0.32	0.30	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.26	0.29	0.29	
X _{Fe} = Fe/(Fe+Mg) ; X _{Mn} = Mn/(Mn+Fe) 。																											

 $X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg)$; $X_{Mn} = Mn/(Mn+Fe)$ 。

续表 6-1
Continued Table 6-1

样品 样号 位置 测点	18-3A										18-3B															
	核					边					核					边										
	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	
Na ₂ O	0.00	0.03	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.06	0.03	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	
MgO	0.13	0.17	0.14	0.12	0.16	0.13	0.18	0.15	0.14	0.13	0.15	0.13	0.16	0.13	0.13	0.15	0.14	0.12	0.06	0.05	0.07	0.07	0.05	0.05	0.10	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	
CaO	1.18	1.32	1.19	1.25	1.29	1.26	1.16	1.04	1.15	1.38	1.37	1.40	1.34	1.33	1.28	1.09	1.06	1.18	1.45	1.36	1.45	1.17	1.34	1.03	1.48	
TiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.00	0.04	0.03	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.06	0.00	0.03	0.03	0.04	
SiO ₂	36.44	36.41	36.61	36.52	36.26	36.44	36.06	36.49	36.40	36.30	36.39	36.08	36.14	36.51	36.36	36.01	36.19	35.73	36.25	36.47	36.64	36.65	36.55	36.52	37.00	
Al ₂ O ₃	20.67	20.33	20.30	20.39	20.42	20.37	20.19	20.60	20.55	20.35	20.39	20.22	20.33	20.63	20.64	20.16	20.55	20.04	20.47	20.44	20.43	20.49	20.43	20.80	20.95	
FeO	29.96	29.81	29.30	29.03	29.54	30.84	32.52	30.95	29.45	28.34	26.20	26.17	28.31	28.04	26.99	28.52	31.04	34.57	30.31	27.82	26.50	25.06	24.43	28.13	31.37	
MnO	11.93	12.19	12.78	13.21	12.58	11.28	9.87	11.33	12.85	14.07	15.83	15.79	13.37	13.68	14.49	13.90	11.59	8.18	12.22	13.91	15.63	17.11	17.76	15.11	10.98	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.04	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	
Total	100.33	100.26	100.35	100.58	100.30	100.35	99.98	100.63	100.60	100.65	100.37	99.82	99.67	100.41	99.95	99.86	100.58	99.85	100.80	100.06	100.81	100.58	100.60	101.71	101.95	
基于 24 个氧原子数计算(阳离子含量单位为 apfu)																										
Si	2.99	3.00	3.01	3.00	2.98	3.00	2.98	2.99	2.99	2.98	2.99	2.98	2.99	3.00	3.00	2.98	2.97	2.97	2.97	3.00	3.00	3.00	3.00	2.97	2.99	
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Al	2.00	1.97	1.96	1.97	1.98	1.97	1.97	1.99	1.99	1.97	1.97	1.97	1.98	2.00	2.00	1.97	1.99	1.96	1.98	1.98	1.97	1.98	1.97	1.99	2.00	
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Fe ³⁺	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.01	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.01	0.00	0.05	0.03	0.06	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	
Fe ²⁺	2.06	2.02	1.98	1.96	2.01	2.09	2.20	2.11	2.00	1.90	1.77	1.77	1.93	1.92	1.86	1.93	2.11	2.34	2.04	1.90	1.78	1.70	1.65	1.89	2.11	
Mn	0.83	0.85	0.89	0.92	0.88	0.79	0.69	0.79	0.89	0.98	1.10	1.11	0.94	0.95	1.01	0.97	0.81	0.58	0.85	0.97	1.08	1.19	1.23	1.04	0.75	
Mg	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Ca	0.10	0.12	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.10	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.10	0.13	0.12	0.13	0.10	0.12	0.09	0.13	
石榴子石端员(摩尔分数/%)																										
Pyr	0.53	0.71	0.56	0.47	0.66	0.53	0.72	0.62	0.56	0.51	0.59	0.54	0.66	0.51	0.52	0.62	0.57	0.48	0.26	0.20	0.27	0.29	0.19	0.21	0.40	
Spe	27.63	28.27	29.69	30.56	29.08	26.14	22.89	26.17	29.65	32.42	36.60	36.68	31.12	31.67	33.63	32.27	26.67	18.97	28.06	32.35	36.08	39.63	41.05	34.38	25.01	
Gro	3.33	2.24	1.97	2.07	2.29	2.26	1.15	2.37	2.30	1.86	2.43	2.11	2.71	3.61	3.75	0.94	1.79	0.41	2.32	3.29	2.67	2.48	2.49	1.78	3.90	
Alm	68.40	67.16	66.25	65.32	66.50	69.63	73.00	70.16	66.44	63.04	58.81	58.67	64.28	63.93	61.84	63.90	69.68	77.10	67.48	63.43	59.41	56.65	54.84	62.44	70.32	
X _{Fe}	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	
X _{Mn}	0.29	0.29	0.31	0.32	0.30	0.27	0.24	0.27	0.31	0.33	0.38	0.38	0.32	0.33	0.35	0.33	0.27	0.19	0.29	0.34	0.37	0.41	0.42	0.35	0.26	

续表 6-2

Continued Table 6-2

样品 样号	石榴子石花岗岩																			
	18-3B																			
	边				核				边				核				边			
测点	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-1	D-2	D-3	D-4
Na ₂ O	0.03	0.00	0.01	0.02	0.05	0.04	0.00	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01
MgO	0.10	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.07	0.10	0.08	0.06	0.05	0.09	0.11	0.12	0.12	0.06	0.08	0.07
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00
CaO	1.54	1.22	1.26	1.35	1.11	1.14	1.41	1.21	1.18	1.07	1.36	0.97	1.34	1.25	1.35	1.18	1.44	0.99	1.28	1.33
TiO ₂	0.00	0.02	0.06	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	36.75	36.55	36.60	36.54	36.10	36.13	36.75	36.72	36.65	36.43	37.09	36.58	36.87	36.71	36.63	35.79	37.64	36.77	36.40	37.08
Al ₂ O ₃	20.77	20.59	20.42	20.35	20.48	20.37	20.57	20.46	20.60	20.38	20.94	20.69	20.73	20.66	20.67	20.35	21.13	20.73	20.50	20.56
FeO	32.03	29.78	26.10	24.36	21.03	21.57	23.84	22.57	24.69	33.11	31.26	25.38	29.31	31.41	30.69	34.41	33.93	25.90	24.25	23.64
MnO	10.28	12.77	16.34	18.20	20.96	20.46	18.44	19.02	17.88	9.91	11.59	17.33	13.00	11.15	11.72	8.25	8.94	16.78	17.85	18.68
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
Total	101.50	100.97	100.86	100.86	99.84	99.75	101.07	100.04	101.10	101.04	102.39	101.02	101.33	101.31	101.19	100.13	103.28	101.23	100.38	101.38
基于24个氧原子数计算(阳离子含量单位为apfu)																				
Si	2.99	2.99	2.99	2.99	2.98	2.98	2.99	3.00	3.02	2.99	2.98	2.99	2.99	3.00	2.99	2.96	3.00	3.00	2.99	3.01
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.99	1.98	1.97	1.96	1.99	1.99	1.98	1.98	1.98	1.97	1.97	1.99	1.99	1.99	1.98	1.98	1.99	1.99	1.98	1.97
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03	0.00	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.03
Fe ²⁺	2.16	2.01	1.75	1.62	1.44	1.47	1.60	1.55	1.66	2.22	2.09	1.72	1.98	2.12	2.07	2.34	2.25	1.75	1.64	1.58
Mn	0.71	0.88	1.13	1.26	1.47	1.43	1.27	1.32	1.24	0.69	0.79	1.20	0.90	0.77	0.81	0.58	0.60	1.16	1.24	1.28
Mg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.13	0.11	0.11	0.12	0.10	0.10	0.12	0.11	0.10	0.09	0.12	0.08	0.12	0.11	0.12	0.10	0.12	0.09	0.11	0.12
石榴子石端员(摩尔分数%)																				
Pyr	0.42	0.24	0.24	0.20	0.17	0.17	0.19	0.21	0.15	0.27	0.42	0.33	0.26	0.21	0.38	0.43	0.48	0.47	0.25	0.28
Spe	23.48	29.37	37.70	41.92	48.71	47.61	42.41	44.41	41.09	22.78	26.28	39.83	29.86	25.57	26.87	19.02	20.16	38.55	41.28	42.98
Gro	3.52	2.37	2.02	1.75	2.58	2.28	2.82	3.29	2.22	0.89	3.03	2.04	3.27	2.53	2.84	1.42	3.59	2.26	2.66	2.59
Alm	71.64	66.85	58.38	53.96	47.85	48.86	53.29	51.87	55.21	73.69	69.49	57.09	66.03	70.42	68.79	77.05	75.26	58.33	54.65	52.87
X _{Fe}	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99
X _{Mn}	0.25	0.30	0.39	0.43	0.50	0.49	0.44	0.46	0.42	0.23	0.27	0.41	0.31	0.26	0.28	0.20	0.21	0.40	0.43	0.44

石榴子石主量元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 FeO 、 MnO 含量变化范围为 34.90%~37.64%、19.59%~21.13%、0.95%~1.54%、0.04%~0.61%、23.63%~30.07%、11.54%~17.24%, 石榴子石中几乎不含 F、Cl 等挥发组分。

石榴子石组分主要为铁铝榴石 (Alm) (60.12%~68.88%) 和锰铝榴石 (Spe) (26.89%~33.89%) 以

及少量的钙铝榴石 (Gro) (3.16%~4.00%) 和镁铝榴石 (Pyr) (<1%)。石榴子石从核部到边部具有贫 Mn 富 Fe 的趋势, 其锰铝榴石 (Spe) 降低 (图 9a), 铁铝榴石 (Alm) 增加, 这样的成分分带与低温和岩浆晚期 (近似伟晶岩类热液) 形成的石榴子石中的成分分带相似 (Manning, 1983)。

石榴子石中的 Fe、Mn、Mg 含量的相对高低, 可

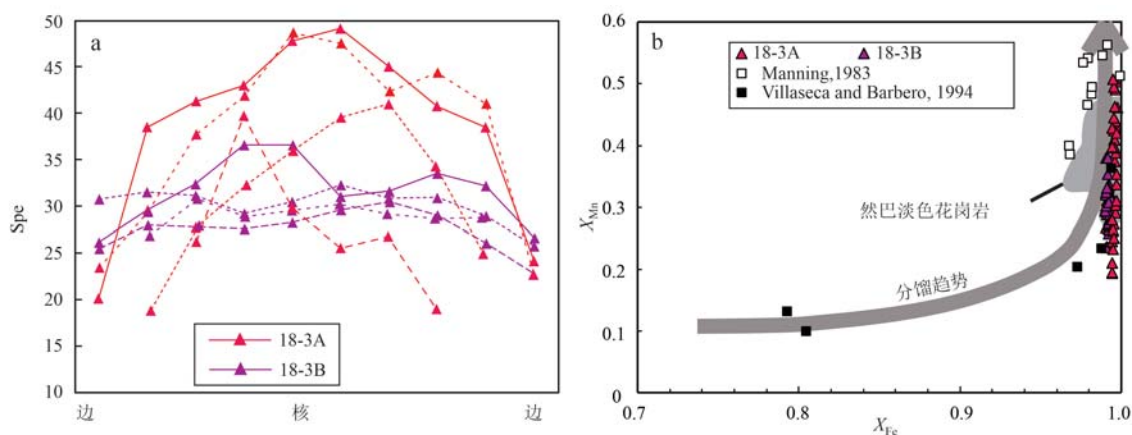


图 9 错那洞淡色花岗岩石榴子石端员成分剖面图 (a) 和 $X_{\text{Mn}}-X_{\text{Fe}}$ 图解 [b, 底图数据来自 Manning (1983)、Villaseca 和 Barbero (1994)]

Fig. 9 Profiles showing the spessartine zoning within the garnets (a) and plot of $X_{\text{Mn}}-X_{\text{Fe}}$ (b, base map from Manning, 1983; Villaseca and Barbero, 1994)

以反映岩浆的分异演化趋势 (Manning, 1983)。错那洞石榴子石花岗岩与然巴石榴子石花岗岩的石榴子石在 $X_{\text{Mn}}-X_{\text{Fe}}$ 图解中均位于岩浆分馏演化的末端 (图 9b), 反映错那洞石榴子石花岗岩与然巴石榴子石花岗岩类似, 均为花岗岩浆高度分异演化形成的 (Villaseca and Barbero, 1994; Liu *et al.*, 2019)。

5 讨论

5.1 淡色花岗岩的分异

前人通过年代学、地球化学的研究认为, 错那洞淡色花岗岩形成于中新世 (22~16 Ma), 与 STDS 向北大规模伸展拆离时间一致 (董汉文等, 2017; 夏祥标等, 2019)。在伸展构造条件下, 高喜马拉雅结晶岩系在快速折返过程中发生变泥质岩减压脱水部分熔融作用形成花岗质岩浆 (吴福元等, 2015; 曾令森等, 2017), 花岗质岩浆在伸展构造环境下侵位过程中发生了显著结晶分异过程 (Ballouard *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2019), 形成了高分异特征的淡色花岗岩。

5.1.1 云母和长石

Scailliet 等 (1995) 模拟了高喜马拉雅淡色花岗

岩的分异结晶实验, 表明随着结晶分异过程 (即岩浆温度的降低) 的进行, 黑云母的 X_{Fe} 值、 Al^{VI} 会逐渐升高。黑云母中 Fe 端员比 Mg 端员的结晶温度更低 (Liu *et al.*, 2019), 因此岩浆熔体逐渐冷却结晶演化过程中, 黑云母中 Mg 含量比 Fe 含量的下降趋势更加明显。错那洞二云母花岗岩的黑云母亦显示出明显的成分差异。随着 X_{Fe} 值的增加, Al^{VI} 和 Mn 的含量具有正相关的增长趋势, 而 Mg 和 Fe 含量有显著的负相关关系 (图 10), 显示出二云母花岗岩中岩浆的高分异结晶演化趋势。

随着岩浆结晶分异作用的发展, 岩浆中 Fe、Mg 含量逐渐减少, 暗色矿物黑云母比例也会随之下降。错那洞淡色花岗岩则表现为早期结晶的二云母花岗岩含有体积分数为 5%~7% 的黑云母 (图 3a), 晚期侵入的电气石花岗岩和石榴子石花岗岩中几乎不含黑云母。从二云母花岗岩到电气石花岗岩和石榴子石花岗岩, 作为贯通矿物的白云母, 其 Al_2O_3 、 Na_2O 含量具有升高的趋势 (31.19%→33.26%→32.69%, 0.37%→0.41%→0.43%), 而 FeO 、 MgO 质量分数具有逐渐降低的特征 (4.20%→3.52%→3.73%, 0.90%→0.45%→0.46%), 反映出岩浆分异演化过

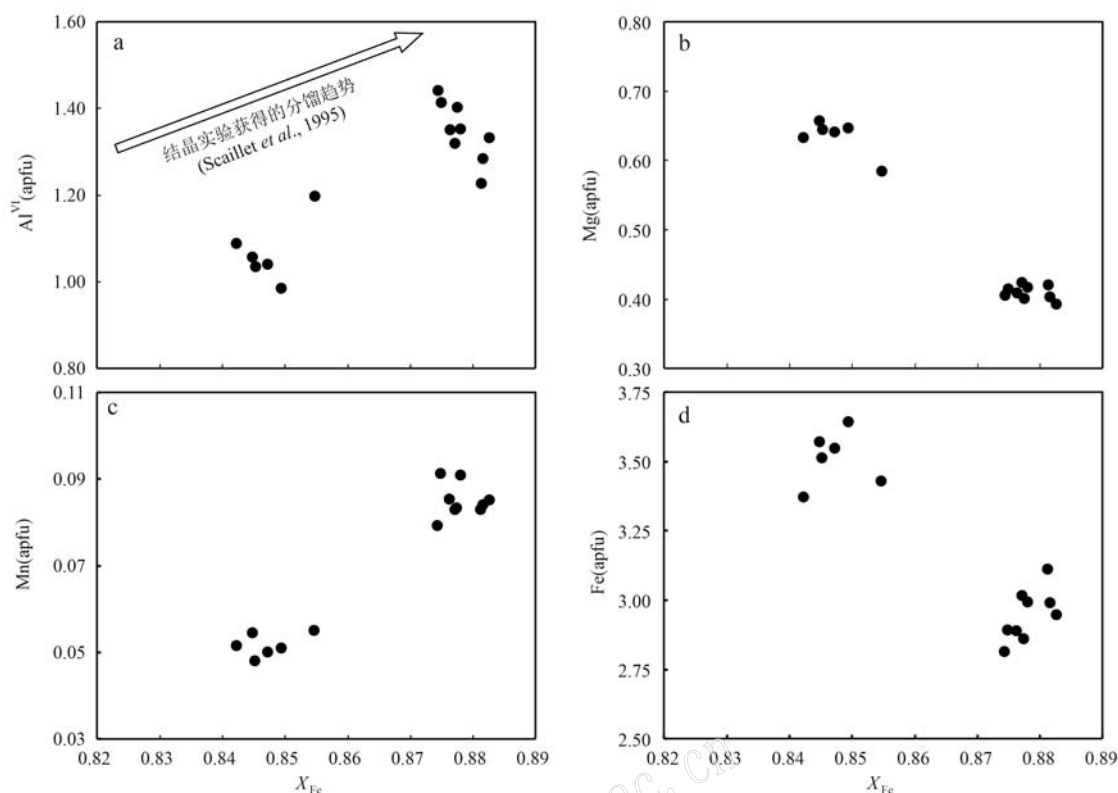


图10 二云母花岗岩中黑云母化学成分图

Fig. 10 Chemical composition of biotite in two mica granite

程中,黑云母等暗色矿物的结晶消耗了岩浆的 Fe、Mg 等元素,花岗岩逐渐向富 Al 富 Na 的方向演化的发展趋势。

从错那洞二云母花岗岩到晚期电气石花岗岩和石榴子石花岗岩,斜长石的钙长石组分 An 平均值逐渐降低(10.1→7.4→7.4),钠长石组分 Ab 值逐渐升高(88.9→91.8→91.3),反映随着岩浆的演化,淡色花岗岩向富 Na 的钠长花岗岩演化的趋势。在全岩地球化学组分上,则表现为 CaO 含量和 CaO/(CaO+Na₂O)值逐渐降低(Liu *et al.*, 2019)。

5.1.2 电气石

花岗岩型电气石呈浸染状分布于电气石花岗岩中,可见柱状晶体内部含有少量的石英包裹体,并且与周围的长石、石英等矿物呈平面或弧形接触,显示平衡共生关系(图 3b),说明花岗岩型电气石与长石、石英等矿物近于同时形成,处于岩浆期的冷却结晶阶段,属于岩浆成因。

伟晶岩型电气石呈柱状或纤维状集合体分布于伟晶岩脉(图 3g),通常切割或交代早期矿物的长石与石英(图 3h、3i),表明其结晶时间要晚于长石和石英。伟晶岩型电气石具有较低的 Mg/(Mg+Fe) 值

(0.04~0.22),并在 Fe-Al-Mg 三元图上分布在贫锂花岗岩、伟晶岩和细晶岩区域(图 8b)。伟晶岩型电气石富 Fe(FeO 含量为 14.33%~15.86%)、富 Al(Al₂O₃ 含量为 30.32%~33.72%)的特征主要受其结晶时热液环境的控制,而非外来富 B 流体加入。因为如果发生岩浆期后的外来富 B 流体交代蚀变作用,伟晶岩型电气石应具有较高的 Mg 含量,表现为在 Fe-Al-Mg 三元图上会趋向于向含铝饱和和相的变泥质岩和变砂屑岩、缺乏铝饱和相的变泥质岩和变砂屑岩区域移动(Yang *et al.*, 2015)。因此,伟晶岩型电气石是属于岩浆-热液过渡阶段的产物。

Henry 和 Dutrow(2012)关于电气石的分区实验表明,低-中盐度流体中电气石的成分变化与 $\square\text{Al}(\text{NaMg})_{-1}$ 交换矢量对应。随着高 Na 和更多的盐水环境下形成的电气石,其成分变化最符合 $\text{AlO}[\text{Mg}(\text{OH})]_{-1}$ 交换矢量。错那洞电气石花岗岩和花岗伟晶岩中的电气石分别符合 $\square\text{Al}(\text{NaR})_{-1}$ 趋势和 $\text{AlO}[\text{R}(\text{OH})]_{-1}$ 趋势(图 8c),在 Mg-Fe 关系图(图 8d)中与 $\square\text{Al}(\text{NaMg})_{-1}$ 趋势和 $\text{AlO}[\text{Mg}(\text{OH})]_{-1}$ 趋势对应。这种特征说明,相对于岩浆成因的花岗岩型电气石,伟晶岩型电气石形成于更加富 Na 和高盐

度的岩浆-热液环境。花岗伟晶岩结晶分异程度比电气石花岗岩更高。

5.1.3 石榴子石

错那洞淡色花岗岩中石榴子石具有高 X_{Fe} (0.990~0.997, 平均 0.993)、 X_{Mn} (0.193~0.507, 平均 0.329) 值, 这是高分异花岗岩的显著性特征 (Villaseca and Barbero, 1994; 图 9b)。石榴子石花岗岩中存在原生白云母 (图 6), 因此富 Mn、Al 流体中黑云母不会结晶, 而会出现石榴子石+白云母的结晶组合 (Miller and Stoddard, 1981)。黑云母的出现, 指示从二云母花岗岩到电气石花岗岩、石榴子石花岗岩 Mg-Fe 含量的减少, 反映不含黑云母的电气石花岗岩、石榴子石花岗岩的结晶分异演化程度高于二云母花岗岩。

由于石榴子石中阳离子 (特别是 Fe^{2+} 、 Mn^{2+}) 的相互扩散非常缓慢, 温度在 600~700℃ 以下时可以忽略不计 (Yardley, 1977), 因此石榴子石的结晶温度一般在 600~700℃ 或是更低。利用全岩锆温度计估算得到的喜马拉雅二云母花岗岩的岩浆温度在 750℃ 左右 (吴福元等, 2015), 说明石榴子石花岗岩的结晶温度要低于二云母花岗岩, 反映了石榴子石花岗岩是在花岗质熔浆分异结晶的晚期形成的。

岩浆熔体中 Mn 的浓度分配主要受到石榴子石晶体的分配控制, 富 Mn 的石榴子石可以直接从花岗岩浆或伟晶岩热液中结晶, 但一般形成于岩浆晚期 (Manning, 1983)。石榴子石边部比核部更加贫 Mn 的分带模式 (图 10a) 与低温的伟晶岩岩浆中的石榴子石相似 (Manning, 1983), 可能代表了石榴子石花岗岩岩浆向伟晶岩岩浆过渡演化的特征。

5.2 结晶分异方式探讨

5.2.1 高度结晶分异特征

一些学者认为淡色花岗岩岩石类型的区别可能是源岩的不同造成的。二云母花岗岩可以由杂砂岩在水饱和条件下熔融产生, 而电气石花岗岩可以由变泥质岩在无水条件下熔融形成 (Guillot and Le Fort, 1995; Harris *et al.*, 1995)。石榴子石花岗岩是变泥质岩在黑云母脱水部分熔融作用下, 熔体捕获转熔作用形成的石榴子石而成 (Villaros *et al.*, 2009)。实验岩石学模拟实验发现, 淡色花岗岩可以通过同一源区的渐进熔融模式形成。电气石花岗岩在高氧逸度条件下可以由黑云母花岗岩分异结晶形成 (Scaillet *et al.*, 1990), 而石榴子石花岗岩可以由二云母花岗岩演化而来 (Scaillet *et al.*, 1995)。近

年来部分学者提出, 喜马拉雅淡色花岗岩的源区岩浆在上侵的过程中遭受过地壳物质的混染, 并经历了高度分离结晶作用, 属于高分异花岗岩 (Zeng *et al.*, 2014; 吴福元等, 2015)。

岩石地球化学、U-Th-Pb 测年研究表明, 错那洞二云母花岗岩、电气石花岗岩和石榴子石花岗岩具有相同的岩浆源区, 在 21~16 Ma 经历了多期次、长时间的岩浆侵位和结晶分异过程 (董汉文等, 2017; 高利娥等, 2017; 张林奎等, 2018; Huang *et al.*, 2018; Xie *et al.*, 2020)。错那洞淡色花岗岩含有丰富的电气石和云母类矿物, 表明其属于富含挥发分 (B、F 等) 的花岗岩体系, 该花岗质熔体具有相当长期的岩浆演化过程。淡色花岗岩全岩地球化学显示出显著的负 Eu 异常 (夏祥标等, 2019; Xie *et al.*, 2020), 表明其经历了强烈的长石结晶分异作用和熔体-流体相互作用 (Liu and Zhang, 2005)。从二云母花岗岩到 (含电气石、石榴子石) 白云母花岗岩, 轻重稀土元素比值降低, 四分组效应明显 (Xie *et al.*, 2020), 也指示了岩浆结晶晚期流体和熔体的相互作用 (Irber, 1999), 反映了岩浆的高度结晶分异演化特征 (吴福元等, 2015)。

错那洞二云母花岗岩到 (含电气石、石榴子石) 白云母花岗岩到花岗伟晶岩, 由于钠长石含量的增加, 全岩 Na_2O 含量和 Na_2O/K_2O 值增加, CaO 和 Sr 含量降低, 反映错那洞二云母花岗岩、石榴子石花岗岩和伟晶岩脉之间具有渐进的分异趋势 (Schwartz, 1992; Xie *et al.*, 2020)。石榴子石花岗岩和电气石花岗岩之间也存在结晶分异演化的先后关系。矿物地球化学证据表明, 电气石与周围的长石、石英等矿物平衡共生的关系代表电气石形成于岩浆冷却结晶的早期。石榴子石具有富 Mn 核心和贫 Mn 边缘的分带模式是更晚分异的特征, 因此, 石榴子石的形成要晚于电气石。错那洞花岗伟晶岩则是岩浆演化过程中, 从含电气石、石榴子石的白云母花岗岩中分离出来的 (Zhou *et al.*, 2019)。花岗伟晶岩中电气石的矿物地球化学证据表明其形成环境比电气石花岗岩中的电气石更加富 Na 和高盐度, 反映其结晶分异演化程度更高。

5.2.2 晶粥体分异模式

根据 Pitcher (1997) 所提出的结晶分异模式, 晶体生长所导致的局部熔体成分变化降低了相邻熔体的密度, 密度的改变使得深层岩体内产生层状结构或成分分带。然而, 在错那洞岩体层状结构或分带

并不常见,电气石-石榴子石花岗岩多以囊状体形式赋存于二云母花岗岩中,而并非层状接触,因此错那洞二云母花岗岩到电气石花岗岩和石榴子石花岗岩的演化并非简单的分离结晶过程,更可能是晶粥体模式。

高硅花岗质岩浆的粘度较高,并且花岗质岩浆结晶的矿物与液体都具有相似且较低的密度,这就导致矿物在结晶时,晶体与高硅岩浆的分离率低下。Michael (1984) 由此提出晶体糊状物分离结晶假说。根据这一假说,晶体与液体在岩浆房中形成一种共存的糊状物体,称为晶粥体 (crystal mush)。晶粥体内晶体只有边部与间隙液体 (interstitial liquid) 接触,核部并不发生成分的改变。因此,结晶矿物晶体之间的间隙液体本身可以通过结晶分异形成高分异的流体,由于结晶周期较长,一部分间隙液体还可以从晶粥体体系中分离出来,形成高分异的衍生物,如流纹岩、细晶岩脉、伟晶岩脉、高度演化的花岗岩。

Liu 等 (2019) 通过对然巴穹隆淡色花岗岩微量元素模拟分析认为,二云母花岗岩岩浆结晶形成了晶粥体及高度分异流体间隙流体,间隙流体冷却结晶形成了 (含石榴子石、电气石) 白云母花岗岩。晶粥体的结晶分异模式,同样可以很好地解释错那洞淡色花岗岩的岩浆演化。淡色花岗质岩浆结晶分异产生的衍生熔体比其母岩浆成分更过 Al, Fe-Mg 质更少 (Scaillet *et al.*, 1995)。从矿物化学组成上来看,错那洞二云母花岗岩到电气石花岗岩和石榴子石花岗岩,黑云母的出现反映了岩浆 Mg-Fe 含量的减少;作为贯通矿物的白云母 Al 含量增加、Mg-Fe 含量减少,恰恰反映了衍生熔体的 Al-Fe-Mg 的成分变化。淡色花岗岩中的白云母和电气石都具有高挥发分含量 (F 和 B), 这有利于降低花岗岩固相线的温度和熔体的粘度 (Sirbescu and Nabelek, 2003), 从而有效提取孔隙流体。由此可以认为,错那洞二云母花岗岩则是由早期结晶矿物与残余的母岩浆组成的晶粥体结晶形成,而电气石花岗岩和石榴子石花岗岩可能是由从晶粥体中分离出来的衍生熔体结晶形成的。

6 结论

本文通过对藏南错那洞淡色花岗岩的研究,分析其中长石、黑云母、白云母、电气石、石榴子石等矿物的地球化学特征,获得以下主要认识:

(1) 错那洞二云母花岗岩、电气石花岗岩、石榴子石花岗岩等淡色花岗岩中碱性长石组分均属于正长石,斜长石组分主要为钠长石,少部分属于更长石。白云母均为原生白云母。二云母花岗岩中黑云母主要为铁叶云母。电气石花岗岩和花岗伟晶岩中的电气石均为碱基组黑电气石。石榴子石主要为铁铝榴石和锰铝榴石。

(2) 从二云母花岗岩到电气石花岗岩和石榴子石花岗岩,碱性长石的组分未发生明显的变化,黑云母 X_{Fe} 、 Al^{VI} 逐渐升高,斜长石显示出逐渐富钠长石的特征,白云母 Al_2O_3 、 Na_2O 含量逐渐升高,反映花岗岩逐渐向富 Al 富 Na 的方向演化的发展趋势。电气石花岗岩和花岗伟晶岩中电气石分别对应中-低盐度和富 Na、高盐度流体环境,Na 的逐渐富集可能指示了花岗伟晶岩的分异演化程度高于电气石花岗岩。石榴子石花岗岩中石榴子石边部比核部更加贫 Mn 的分带模式与低温的伟晶岩岩浆热液 (Manning, 1983) 当中的石榴子石相似,可能代表了石榴子石花岗岩岩浆向伟晶岩岩浆过渡的过程。

(3) 错那洞二云母花岗岩、电气石花岗岩、石榴子石花岗岩和花岗伟晶岩具有强烈的分异趋势。二云母花岗岩是由早期结晶矿物与残余的母岩浆组成的晶粥体结晶形成,而电气石花岗岩和石榴子石花岗岩可能是由从晶粥体中分离出来的衍生熔体结晶形成的。

References

- Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas [J/OL]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525~541. doi:10.1093/petrology/35.2.525
- Ballouard C, Boulvais P, Poujol M, *et al.* 2015. Tectonic record, magmatic history and hydrothermal alteration in the Hercynian Guérande leucogranite, Armorican Massif, France [J/OL]. *Lithos*, 220~223: 1~22. doi.org/10.1016/j.lithos.2015.01.027
- Dai Zuowen, Li Guangming, Ding Jun, *et al.* 2019. Chemical and boron isotopic composition, and significance of tourmaline from the Cuona-dong tourmaline granite, Tibet [J]. *Earth Science*, 44(6): 1 849~1 859 (in Chinese with English abstract).
- Debon F, Le Fort P, Sheppard S M F, *et al.* 1986. The four plutonic belts of the Transhimalaya-Himalaya: A chemical, mineralogical, isotopic and chronological synthesis along a Tibet-Nepal section [J]. *J. Petrol.*, 27(1): 219~250.

- Dong Hanwen, Xu Zhiqin, Meng Yuanku, *et al.* 2017. Geochronology of leucogranites in the Cuonadong dome, southern Tibet and limitation of the timing of the Southern Tibet Detachment System (STDS) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(12): 3 741~3 752 (in Chinese with English abstract).
- Dutrow B L and Henry D J. 2018. Tourmaline compositions and textures: Reflections of the fluid phase[J/OL]. *Journal of Geosciences*, 63: 99~110. doi.org/10.3190/jgeosci.256
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. *U. S. Geol. Surv. Prof.*, 354: 11~49.
- Fu Jiangang, Li Guangming, Wang Genhou, *et al.* 2018. Timing of E-W extension deformation in North Himalaya: Evidences from Ar-Ar age in the Cuonadong Dome, South Tibet[J]. *Earth Science*, 43(8): 2 638~2 650 (in Chinese with English abstract).
- Gao Li'e, Gao Jiahao, Zhao Linghao, *et al.* 2017. The Miocene leucogranite in the Nariyongcuo gneiss dome, southern Tibet: Products from melting metapelite and fractional crystallization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2 395~2 411 (in Chinese with English abstract).
- Guillot S and Le Fort P. 1995. Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites[J/OL]. *Lithos*, 35: 221~234. doi.org/10.1016/0024-4937(94)00052-4
- Harris N, Ayres M and Massey J. 1995. Geochemistry of granitic melts produced during the incongruent melting of muscovite: Implications for the extraction of Himalayan leucogranite magmas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100: 15 767~15 777.
- Harrison T M, Lovera O M and Grove M. 1997. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts[J/OL]. *Geology*, 25: 899~902. doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0899:NIITOO>2.3.CO;2
- Henry D J and Dutrow B L. 2011. The incorporation of fluorine in tourmaline: Internal crystallographic controls or external environmental influences? [J/OL]. *The Canadian Mineralogist*, 49(1): 41~56. doi.org/10.3749/canmin.49.1.41
- Henry D J and Dutrow B L. 2012. Tourmaline at diagenetic to low-grade metamorphic conditions: Its petrologic applicability[J/OL]. *Lithos*, 154: 16~32. doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.013
- Henry D J and Guidotti C V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral—An example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine[J/OL]. *American Mineralogist*, 70(1~2): 1~15. doi.org/10.1530/JME-15-0227
- Henry D J, Novák M, Hawthorne F C, *et al.* 2011. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals[J/OL]. *American Mineralogist*, 96(5~6): 895~913. doi.org/10.2138/am.2011.3636
- Huang C M, Li G M, Zhang Z, *et al.* 2018. Petrogenesis of the Cuonadong leucogranite in South Tibet: Constraints from bulk-rock geochemistry and zircon U-Pb dating[J]. *Earth Sci. Front.*, 5(6): 182~195.
- Huang Chunmei, Li Guangming, Zhang Zhi, *et al.* 2018. Petrogenesis of the Cuonadong leucogranite in South Tibet: Constraints from bulk-rock geochemistry and zircon U-Pb dating[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 182~195 (in Chinese with English abstract).
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. *Geochim. Cosmochim.*, 63(3~4): 489~508.
- Le Fort P. 1975. Himalayas: The collided range. Present knowledge of the continental arc[J]. *American Journal of Science*, 275: 1~44.
- Li Guangming, Zhang Linkui, Jiao Yanjie, *et al.* 2017. First discovery and implications of Cuonadong superlarge Be-W-Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 1 003~1 008 (in Chinese with English abstract).
- Liang Wei, Zhang Linkui, Xia Xiangbiao, *et al.* 2018. Geology and preliminary mineral genesis of the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit, Southern Tibet, China[J]. *Earth Science*, 43(8): 2 742~2 754 (in Chinese with English abstract).
- Lin Bin, Tang Juxing, Zheng Wenbao, *et al.* 2016. Geochemical characteristics, age and genesis of Cuonadong leucogranite, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(3): 391~406 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenwei and Peng Lijun. 1994. The estimation of Fe³⁺ and Fe²⁺ contents in amphibole and biotite from EMPA data [J]. *Journal of Changchun Institute of Geology*, (2): 155~162 (in Chinese with English abstract).
- Liu C Q and Zhang H. 2005. The lanthanide tetrad effect in apatite from the Altay No. 3 pegmatite, Xingjiang, China: An intrinsic feature of the pegmatite magma[J/OL]. *Chemical Geology*, 214: 61~77. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.08.054
- Liu Z C, Wu F Y, Liu X C, *et al.* 2019. Mineralogical evidence for fractionation processes in the Himalayan leucogranites of the Ramba Dome, southern Tibet[J/OL]. *Lithos*, 340~341: 71~86. doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.004
- Manning D A. C. 1983. Chemical variation in garnets from aplites and pegmatites, peninsular Thailand[J/OL]. *Mineralogical Magazine*, 47: 353~358. doi.org/10.1180/minmag.1983.047.344.10
- Michael P J. 1984. Chemical differentiation of the Cordillera Paine granite (southern Chile) by in situ fractional crystallization[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 87: 179~195.

- Miller C F and Stoddard E F. 1981. The role of manganese in the paragenesis of magmatic garnet: An example from the old woman-piute range, California[J/OL]. *Journal of Geology*, 89: 233~246. doi.org/10.1086/628582
- Miller C F, Stoddard E F, Bradfish L J, *et al.* 1981. Composition of plutonic muscovite: Genetic implications[J]. *Can. Mineral.*, 19: 25~34.
- Pitcher W S. 1997. *The Nature and Origin of Granite* (2nd Edition) [M]. London: Chapman & Hall, 1~387.
- Scailliet B, France-Lanord C and Le Fort P. 1990. Badrinath-Gangotri plutons (Garhwal, India)-petrological and geochemical evidence for fractionation processes in a High Himalayan leucogranite[J/OL]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 44: 163~188. doi.org/10.1016/0377-0273(90)90017-A
- Scailliet B, Pichavant M and Roux J. 1995. Experimental crystallization of leucogranite magmas[J/OL]. *Journal of Petrology*, 36(3): 663~705. doi.org/10.1093/petrology/36.3.663
- Schwartz M O. 1992. Geochemical criteria for distinguishing magmatic and metasomatic albite-enrichment in granitoids—Examples from the Ta-Li granite Yichun (China) and the Sn-W deposit Tikus (Indonesia) [J]. *Miner. Depos.*, 27: 101~108.
- Sirbescu M L and Nabelek P I. 2003. Crustal melts below 400°C [J/OL]. *Geology*, 31(8): 685~688. doi.org/10.1130/G19497.1
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, Northwest Superior Province, Ontario, Canada [J/OL]. *The Canadian Mineralogist*, 38(2): 455~470. doi.org/10.2113/gscanmin.38.2.455
- Villaras A, Stevens G, Moyen J F, *et al.* 2009. The trace element compositions of S-type granites: Evidence for disequilibrium melting and accessory phase entrainment in the source[J/OL]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 158(4): 543~561. doi.org/10.1007/s00410-009-0396-3.
- Villaseca C and Barbero L. 1994. Chemical variability of Al-Ti-Fe-Mg minerals in peraluminous granitoid rocks from Central Spain[J]. *European Journal of Mineralogy*, 6(5): 691~710.
- Wang Rucheng, Wu Fuyuan, Xie Lei, *et al.* 2017. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet[J/OL]. *Science China Earth Sciences*, 47: 871~880. doi: 10.1007/s11430-017-9075-8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxian, Zhang Jinjiang, Yan Shuyu, *et al.* 2016. Zircon U-Pb and muscovite ^{40}Ar - ^{39}Ar chronology of the Chongba leucogranites in south Tibet and its geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(2): 242~254 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Liu X C, Liu Z C, *et al.* 2020. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization [J/OL]. *Lithos*, 352~353: 105319. doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105319
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research [J/OL]. *Science China Earth Sciences*, 60: 1201~1219. doi:10.1007/s11430-016-5139-1 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, *et al.* 2015. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1~36 (in Chinese with English abstract).
- Xia Xiangbiao, Li Guangming, Cao Huawen, *et al.* 2019. Petrogenic age and geochemical characteristics of the mother rock of skarn type ore body in the Cuonadong super-large Be-W-Sn polymetallic deposit, Southern Tibet[J]. *Earth Science*, 44(7): 2207~2223 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Kun, Xue Chuandong, Xie Zhipeng, *et al.* 2019. Petrogenesis of the late Yanshanian Laba granite in northwestern Yunnan Province and its metallogenic implications: Evidence from mineral chemistry of biotites and amphiboles [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(1): 34~46 (in Chinese with English abstract).
- Xie L, Tao X Y, Wang R C, *et al.* 2020. Highly fractionated leucogranites in the eastern Himalayan Cuonadong dome and related magmatic Be-Nb-Ta and hydrothermal BeWeSn mineralization [J/OL]. *Lithos*, 354~355: 105286. doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105286.
- Yang S Y, Jiang S Y and Palmer M R. 2015. 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/OL]. *Chemical Geology*, 419: 102~113. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.10.026.
- Yardley B W D. 1977. An empirical study of diffusion in garnet[J]. *American Mineralogist*, 62(7~8): 793~800.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211~280.
- Zeng Lingsen and Gao Li'e. 2017. Cenozoic crustal anatexis and the leucogranites in the Himalayan collisional orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1420~1444 (in Chinese with English abstract).
- Zeng L S, Gao L E, Tang S H, *et al.* 2014. Eocene magmatism in the Tethyan Himalaya, southern Tibet[J/OL]. *Geological Society*, 412: 287~316. doi.org/10.1144/SP412.8

- Zhang Hongfei, Harris N, Parrish R, *et al.* 2005. Geochemistry of North Himalayan leucogranites: Regional comparison, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 275 ~ 288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Linkui, Zhang Zhi, Li Guangming, *et al.*, 2018. Rock assemblage, structural characteristics and genesis mechanism of the Cuonadong dome, Tethys Himalaya[J]. *Earth Science*, 43(8): 2 664 ~ 2 683(in Chinese with English abstract).
- Zhang R X and Yang S Y. 2016. A mathematical model for determining carbon coating thickness and its application in electron probe microanalysis[J/OL]. *Microscopy and Microanalysis*, 22(6): 1 374 ~ 1 380. doi. org/10.1017/s143192761601182x.
- Zhou Q, Li W C, Wang G C, *et al.* 2019. Chemical and boron isotopic composition of tourmaline from the Cuonadong leucogranite-pegmatite system in South Tibet[J/OL]. *Lithos*, 326~327: 529~539. doi. org/10.1016/j. lithos. 2019. 01. 003.
- 附中文参考文献
- 代作文, 李光明, 丁俊, 等. 2019. 西藏错那洞电气石花岗岩中电气石化学组成、硼同位素特征及意义[J]. *地球科学*, 44(6): 1 849~1 859.
- 董汉文, 许志琴, 孟元库, 等. 2017. 藏南错那洞淡色花岗岩年代学研究及其对藏南拆离系活动时间的限定[J]. *岩石学报*, 33(12): 3 741~3 752.
- 付建刚, 李光明, 王根厚, 等. 2018. 北喜马拉雅 E-W 向伸展变形时限:来自藏南错那洞穹隆 Ar-Ar 年代学证据[J]. *地球科学*, 43(8): 2 638~2 650.
- 高利娥, 高家昊, 赵令浩, 等. 2017. 藏南拿日雍错片麻岩穹隆中新世淡色花岗岩的形成过程: 变泥质岩部分熔融与分离结晶作用[J]. *岩石学报*, 33(8): 2 395~2 411.
- 黄春梅, 李光明, 张志, 等. 2018. 藏南错那洞淡色花岗岩成因:来自全岩地球化学和锆石 U-Pb 年龄的约束[J]. *地学前缘*, 25(6): 182~195.
- 李光明, 张林奎, 焦彦杰, 等. 2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿的发现及意义[J]. *矿床地质*, 36(4): 1 003~1 008.
- 梁维, 张林奎, 夏祥标, 等. 2018. 藏南地区错那洞钨锡多金属矿床地质特征及成因[J]. *地球科学*, 43(8): 2 742~2 754.
- 林彬, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 2016. 西藏错那洞淡色花岗岩地球化学特征、成岩时代及岩石成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(3): 391~406.
- 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.
- 王汝成, 吴福元, 谢磊, 等. 2017. 藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究[J]. *中国科学:地球科学*, 47(8): 871~880.
- 王晓先, 张进江, 闫淑玉, 等. 2016. 藏南冲巴淡色花岗岩锆石 U-Pb、白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(2): 242~254.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学:地球科学*, 47(7): 745~765.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. *岩石学报*, 31(1): 1~36.
- 夏祥标, 李光明, 曹华文, 等. 2019. 西藏南部错那洞矽卡岩型铍钨锡多金属矿床成矿母岩成岩时代及其地球化学特征[J]. *地球科学*, 44(7): 2 207~2 223.
- 向坤, 薛传东, 谢志鹏, 等. 2019. 滇西北拉巴燕山晚期花岗岩岩石成因及其成矿指示——黑云母和角闪石矿物化学证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 38(1): 34~46.
- 曾令森, 高利娥. 2017. 喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩[J]. *岩石学报*, 33(5): 1 420~1 444.
- 张宏飞, Harris N, Parrish R, 等. 2005. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学:区域对比、岩石成因及其构造意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(3): 275~288.
- 张林奎, 张志, 李光明, 等. 2018. 特提斯喜马拉雅错那洞穹隆的岩石组合、构造特征与成因[J]. *地球科学*, 43(8): 2 664~2 683.