



2020 江西地学新进展

New Advancement
of Jiangxi Geoscience

江西省地质学会 编



江西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

2020 江西地学新进展 / 江西省地质学会编. —南昌:
江西科学技术出版社, 2021.6
ISBN 978-7-5390-7786-4

I. ①2… II. ①江… III. ①区域地质—江西—文集
IV. ①P562.56-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 108011 号

国际互联网(Internet)地址:

<http://www.jxkjcs.com>

选题序号:ZK2021199

图书代码:B21119-101

2020 江西地学新进展

江西省地质学会编

出版 江西科学技术出版社
发行 江西科学技术出版社
社址 南昌市蓼洲街2号附1号
邮编:330009 电话:(0791)86624275 86610326(传真)
印刷 江西山水印务有限公司
经销 各地新华书店
开本 889mm×1194mm 1/16
印张 13
字数 323千字
版次 2021年6月第1版 2021年6月第1次印刷
书号 ISBN 978-7-5390-7786-4
定价 75.00元

赣版权登字-03-2021-169

版权所有 侵权必究

(赣科版图书凡属印装错误,可向承印厂调换。服务电话:0791-85215254)

《2020 江西地学新进展》编委会

主 任:胡 宪

副 主 任:侯克常 余忠珍 韦星林 何观生 郑再邦 李重贵 孙占学
林国尧 徐有华

委 员:王先广 朱 忠 徐祖丰 洪文忠 刘建光 熊清华 万浩章
罗中华 周小彬 曾载淋 曾马荪 颜 春 谢德湘 刘文民
汤国平 谢春华 刘启德 周锦中 张志和 郭福生 阙足双
潘开明 黄德保 万昌林 黄金如 黄 文 熊梨芳 裔 刚
胡正华 吴耕云 祝平俊 曾文乐 刘效贤 杨昔林 何维基
夏 菲 胡树华 柳汉丰 龚 健 管志炜 叶长盛

顾 问:包家宝 杨明桂

主 编:胡 宪

副 主 编:侯克常 王先广

编 委:王发宁 巢志众 白细民 曾文乐 付小任 胡正华 吴耕云
龙 梅 李华珍 谢嘉慧

英文校对:龙 梅

文字排版:嵇书颖

出版说明

《江西地学新进展》自 2009 年出版首辑以来,已连续出版十辑,成为在江西省乃至全国都颇有影响的地学出版物。《江西地学新进展》收录论文涉及内容广泛,既有基础理论的最新研究成果,也有地质找矿突破方面的丰富实践;既有勘查技术与找矿工艺方面的最新进展以及江西省内乃至国内地质找矿与科学研究的丰硕成果,也有境外勘查工作所取得的良好成绩。反映了多年来江西省地质科技工作者的学术水平。《江西地学新进展》已成为江西省广大地质科技工作者学术交流的载体和展示地学成果的平台。本着继续为广大会员服务、为地质科技工作者服务的宗旨,为加强学术交流,促进江西省地质科学学术水平的提高,江西省地质学会继续组织编辑出版了《2020 江西地学新进展》一书。

《2020 江西地学新进展》汇编了《江西地质》杂志 2020 年 1~4 期发表的论文,共收录各类论文 30 篇,涵括基础地质、矿产地质、水工环地质、生态环境与新能源、技术与方法五个方面的内容,展示了江西省近年地质科技工作的最新成果。

由于时间紧、内容多、工作量大,书中可能还存有差错,敬请批评指正。

江西省地质学会

2021 年 5 月

目 录

江西宜丰县大港矿区超大型含锂瓷石矿床地质特征及成因机制探讨	李仁泽,周正兵,彭 波,等/1
九瑞地区滑石矿找矿前景分析	董宜勇,周宣霏,付 斌/12
新疆东准噶尔三塘湖地区巴塔玛依内山组火山岩地球化学特征及其构造环境初探	陈红生,刘高峰,刘小龙,等/16
赣西蒙山地区硅灰石矿床类型探讨及意义	成绪光/26
湘竹钒矿地质特征及成因浅析	樊 涛,温润涛/34
赣南断陷盆地带地热水分布特征及勘查方向探讨	成绪光,刘 捷/40
江西千子岭铅锌矿床地质特征与找矿启示	李淑琴,陈立泉,周先军/49
江西石城县上温寮地热水地温场特征研究	樊柄宏,白细民,邹国瑶,等/54
原子荧光光谱法同时测定土壤中砷、汞的方法研究	郑春阳/60
诸广岩体中部鹿井地区辉绿岩 Ar-Ar 年龄、地球化学特征及其构造环境	张万良,李子颖/66
奥维互动地图在地质工作中的应用	彭正泉,蒋俊平,邓以超/77
武山铜矿人工高陡边坡稳定性分析及加固设计	周汉初,李明骏/83
县级第三轮矿产资源规划编制存在的问题及建议探析	汪国华,廖传茂,周汉初/87
新疆旅游地质资源分类方案研讨	万 欢,李 凯/92
钦—杭结合带江西段构造相特征与洋陆汇聚形式初析	于成涛,龙军军/96
桃山铀矿田罗布里岩体对铀成矿影响	夏应冰,王 乐,俞一凡/100
澳北部不整合面型铀矿航放勘查信息的提取与分析	贺 婷,周 宁,李 莉/110
桃山矿田铀矿成矿模式研究	俞一凡,王 乐,夏应冰 /118
江西赣县金竹坪钨矿地质特征及找矿方向	范世祥,陶建利,杨洲畚,等 /127
江西陶瓷矿产与高质量产业发展	王先广,陈国华,詹天卫,等 /137
赣州西坑矿区水文地质条件及充水因素分析	付经刚 /149
江西灵山环状花岗杂岩及其地貌景观特征	吕 鑫,郭金山/153
兴国盆地地下水勘查成果总结	吴琳伟,胡啟锋,马晓红,等/161
龙虎山地质研学路线的自然和人文景观	占义勇,陈留勤,郭福生,等/166

江西龙虎山研学路线方案设计	陈 扬,曹秋香/171
江西武功山地学研学路线方案	谢长瑜,刘冰权,张永忠/176
江西宁都地学研学旅行路线的设计与思考	张炜强,郭福生,陈留勤,等/181
江西黄石镇大洲塘地质文化村建设与思考	刘 勇,曾 鑫,杨庆坤,等/186
庐山第四纪冰川遗迹研学路线	钟 波,项新葵,廖洪鑫,等/191
江西省地质旅游简述及其发展现状	陈 扬,曹秋香,宋华佳,等/196

Contents

- Discussion on the geological characteristics and genetic mechanism of superlarge-scale lithium-bearing chinastone deposit in Dagang mining area, Yifeng County, Jiangxi Province
..... LI Renze, ZHOU Zhengbing, PENG Bo, et al.(11)
- Analysis on prospecting prospect of talc ore in Jiurui area DONG Yiyong, ZHOU Xuanfei, FU Bin(15)
- A discussion on the geochemical characteristics and sedimentary tectonic environment of the volcanic rocks of Batamayi Neishan Formation in the Santanghu area of eastern Junggar, Xinjiang
..... CHEN Hongsheng, LIU Gaofeng, LIU Xiaolong, et al.(25)
- Discussion and implications of wollastonite deposit in the Mengshan area of western Jiangxi
..... CHENG Xuguang(33)
- Discussion on the geological characteristics and genesis of Xiangzhu vanadium deposit
..... FAN Tao, WEN Runtao(39)
- Discussion on the distribution characteristics and exploration direction of the geothermal water in the fault faulted structural belt basin zone in South Jiangxi CHENG Xuguang, LIU Jie(48)
- Geological characteristics and prospecting inspiration of Qianziling lead-zinc deposit in Jiangxi Province
..... LI Shuqin, CHEN Liqian, ZHOU Xianjun(53)
- A study on characteristics of ground temperature field of Shangwenliao geothermal water in Shicheng County, Jiangxi Province FAN Binghong, BAI Ximin, ZOU Guoyao, et al.(59)
- Simultaneous determination of arsenic and mercury in soil by atomic fluorescence spectrometry
..... ZHENG Chunyang(65)
- Ar-Ar age, geochemical characteristics, and tectonic environment of the diabase in Lujing area, central Zhuguang rock mass ZHANG Wanliang, LI Ziyong(76)
- The application of otivalmap in geological survey PENG Zhengquan, JIANG Junping, DENG Yichao(82)
- Stability analysis and reinforcement design of artificial high steep slope in Wushan copper mine
..... ZHOU Hanchu, LI Mingjun(86)
- Problems and suggestions for compiling county-level mineral resources planning
..... WANG Guohua, LIAO Chuanmao, ZHOU Hanchu(91)
- Discussion on the classification scheme of tourism geological resources in Xinjiang WAN Huan, LI Kai(95)
- An analysis on tectofacial features of Qin-Hang suture zone within Jiangxi Province and the ocean-continent convergent model YU Chengtao, LONG Junjun(99)
- Influence of Luobuli rock mass in Taoshan uranium orefield on uranium mineralization
..... XIA Yingbing, WANG Le, YU Yifan(109)
- Extraction and analysis of prospecting information of unconformity surface type uranium deposit in north Australia
..... HE Ting, ZHOU Ning, LI Li(117)
- Research on metallogenic model of uranium deposit in Taoshan orefield
..... YU Yifan, WANG Le, XIA Yingbing(126)

Geological characteristics and prospection of Jinzhuping tungsten deposit in Ganxian, Jiangxi Province	FAN Shixiang, TAO Jianli, YANG Zhouyu, et al. (136)
On development of ceramic minerals and high quality industry of Jiangxi Province	WANG Xianguang, CHEN Guohua, ZHAN Tianwei, et al. (148)
Analysis of hydrogeological conditions and water filling factors in Xikeng Mining area of Ganzhou	FU Jingang (152)
Geological and geomorphologic landscape characteristics of Lingshan ring granitic complex, Jiangxi	LV Xin, GUO Jinshan (160)
Summary of the exploration results for underground water in Xingguo Basin	WU Linwei, HU Qifeng, MA Xiaohong, et al. (165)
Natural and cultural landscapes of the geological research routes in Longhushan Global Geopark	ZHAN Yiyong, CHEN Liuqin, GUO Fusheng, et al. (170)
The project design for the routes of geoscientific in Longhu Mountain Global Geopark, Jiangxi Province	CHEN Yang, CAO Qiuxiang (175)
The plan for the route geoscientific research in Wugong Mountain, Jiangxi Province	XIE Changyu, LIU Bingquan, ZHANG Yongzhong (180)
The design and thinking for research route of geoscience in Ningdu County, Jiangxi Province	ZHANG Weiqiang, GUO Fusheng, CHEN Liuqin, et al. (185)
Thinking and construction of Dazhoutang Geo-Cultural Village in Huangshi Town, Jiangxi Province	LIU Yong, ZENG Xin, YANG Qingkun, et al. (190)
The research route of Quaternary glacial remains in Mount Lushan	ZHONG Bo, XIANG Xinkui, LIAO Hongxin, et al. (196)
Brief introduction to geological tourism in Jiangxi Province its and development status	CHEN Yang, CAO Qiuxiang, SONG Huajia, et al. (200)

江西宜丰县大港矿区超大型含锂瓷石矿床 地质特征及成因机制探讨

李仁泽¹,周正兵²,彭波¹,陈骏¹,余会强¹,万建军²,杨爽²

(1.江西省核工业地质局二六七大队,江西九江 332000;

2.东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西南昌 330013)

摘要:大港含锂瓷石矿床为典型的含锂云母碱长花岗岩型矿床,远景资源量有望突破 1×10^6 t。含锂瓷石矿体厚度 21.62 ~ 148.88m,其中 Al_2O_3 含量 15.38% ~ 23.97%, Li_2O 含量 0.30% ~ 1.06%,同时伴生 Rb、Cs、Ta、Nb 等稀有金属。矿石矿物组成为钠长石、锂云母或锂白云母,白度达 80%以上。化学组成上,表现出富硅,贫铁、镁、钛,高磷的特征;铝饱和指数 A/CNK 值大于 1.20,Zr/Hf 比值(< 12)与 Nb/Ta 比值(< 2)极低,表明具有高分异的过铝质 S 型花岗岩特性。由构造环境判别图解可知,大港含锂云母碱长花岗岩应形成于同碰撞或后碰撞早期阶段的伸展构造背景下,极低的 CaO/Na₂O 比值(< 0.2),指示岩体的源区应为富黏土矿物的变质泥质岩。

关键词:大港矿床;含锂瓷石;含锂云母碱长花岗岩;岩浆分异演化;甘坊岩体

1 引言

近年来,随着新能源汽车产业的兴起,对锂离子电池的需求量与日俱增,世界各主要经济体纷纷将锂及稀有金属作为关键矿产资源,进行了重点规划(毛景文等,2019)。江西省作为我国硬岩锂矿的主产地之一,主要分布于武功山钽铌锂稀有金属矿集区和宜丰钽铌锂稀有金属矿田等两大成矿带内(杨泽黎等,2014;李胜虎,2015;王成辉等,2019)。甘坊岩体为宜丰钽铌锂稀有金属矿田的重要赋矿岩体,已发现众多含锂瓷石矿床,如白水洞矿床(Li_2O 资源量 1.211×10^6 t)、同安党田矿床(Li_2O 资源量 4.047×10^6 t;吴学敏等,2016)以及近期我队勘查发现的大港矿床,均为大型—超大型规模。

大港矿床位于宜丰甘坊岩体内东侧高岭—白水洞含锂云母碱长花岗岩带的中心部位,是区内较为富集 Li、Rb、Cs 等稀有金属矿化带(吴学敏等,2016)。现阶段累计查明含锂瓷石矿资源储量 9.19194×10^7 t,其中伴生 Li_2O 资源量 3.901×10^5 t(平均品位 0.51%),为超大型含锂瓷石矿床,这对宜春市打造“亚洲锂都”具有重要意义。本文从大港矿床地质特征入手,探讨了含锂云母碱长花岗岩的岩相学、地球化学特征以及成岩成矿的可能机制。通过本次研究,期望为该地区后期找矿工作指明方向。

2 区域地质背景

甘坊岩体出露于上富—甘坊—谭山镇一带,面积为 224.82 km^2 ,大体呈东西向,椭圆形。在大地构造

本文获得江西省核工业地质局资源储备勘查项目(编号:2019UZK06)、2020年度江西省核工业地质局科技创新项目“甘坊岩体锂及稀有金属成矿特征及找矿方向研究”的联合资助。

第一作者简介:李仁泽(1988—),男,工程师,地质学硕士,主要从事地质矿产勘查工作。

位置上,图 1(a),位于赣北扬子板块的三级构造单元九岭逆冲隆起南翼,宜丰—景德镇深大断裂带与铜鼓西—奉新上富断裂之间。甘坊岩体产于新元古代九岭岩体中部,侵入时代为中生代,岩性变化总趋势是由中粗粒斑状黑云母花岗岩→中粗粒斑状二云母花岗岩→中细粒含斑—斑状二云母花岗岩→中细粒钠化白(锂)云母花岗岩,图 1(b)。(周建廷等,2011)。甘坊岩体的锂矿化主要赋存于钠长石化白(锂)云母化花岗岩和细晶岩中,含矿独立矿物为锂云母,其次为锂白云母。周建廷等(2011)提出,甘坊岩体中岩石锂云母化、钠长石化越强,氧化锂含量越高;岩石颗粒越细,氧化锂含量越高。

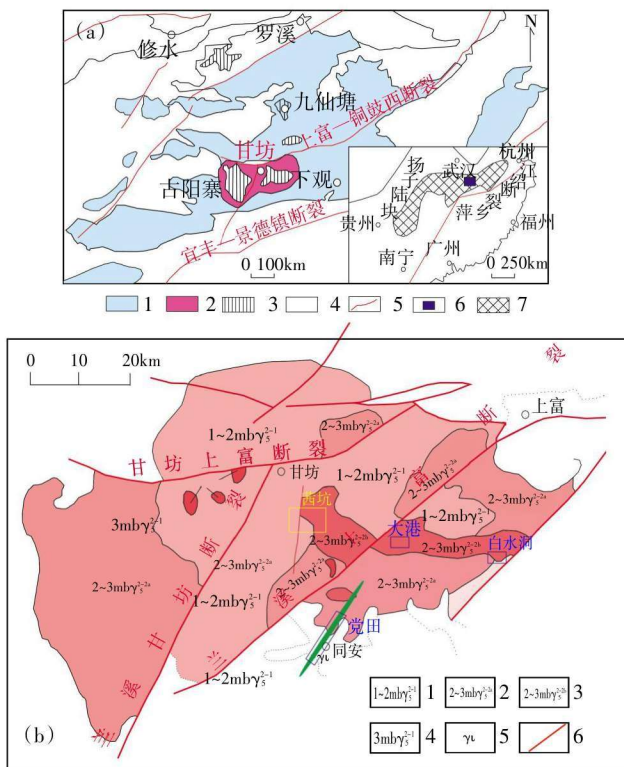


图 1 甘坊岩体大地构造位置图(a)(据秦程,2018 修改)与地质构造图(b)

Fig.1 Geotectonic location map of Ganfang granite (a) (after Qincheng,2018) and geological structure map(b)

(a):1.九岭岩体;2.甘坊岩体;3.燕山期岩体;4.震旦—奥陶系;5.断裂;6.研究区;7.江南隆起区

(b):1.燕山早期第一阶段中粗粒二云母花岗岩;2.燕山早期第二阶段第一次中细粒二云母花岗岩;3.燕山早期第二阶段第二次中细粒白(锂)云母花岗岩;4.燕山晚期第一阶段细粒二云母花岗岩;5.细晶岩脉;6.断裂构造

3 矿床地质特征

3.1 矿体特征

大港矿区内矿体可分为含锂瓷石和瓷石两种矿体,其中含锂瓷石矿占总资源储量的 84%。含锂瓷石可分为两种类型:含锂云母碱长花岗岩型和斑状钾长花岗岩型,含锂云母碱长花岗岩型为主要矿体,占总资源储量近 90%。

含锂云母碱长花岗岩矿体呈面型分布于 0、1、3、5、7 号勘探线间和 2 号勘探线下部,图 2(a)。矿区内出露长约 1250m,宽约 400m,面积 0.375km²。矿体整体呈近东西走向,向南侧伏,倾角 40°~50°。除 ZK0701 钻孔为瓷石外,其余 11 个钻孔均见含锂瓷石矿体,图 2(b)。

含锂瓷石矿见矿厚度 21.62~148.88m,平均厚度 77.97m,自上至下可分为中风化含锂瓷石矿(矿体厚度 4.00~27.83m,平均厚度 10.75m)和未风化含锂瓷石矿(矿体厚度 14.00~126.86m,平均厚度 61.14m)。各层矿体较稳定,矿石质量较好,组分均匀。

大港矿床锂矿化与岩体剥蚀深度有关,在地表

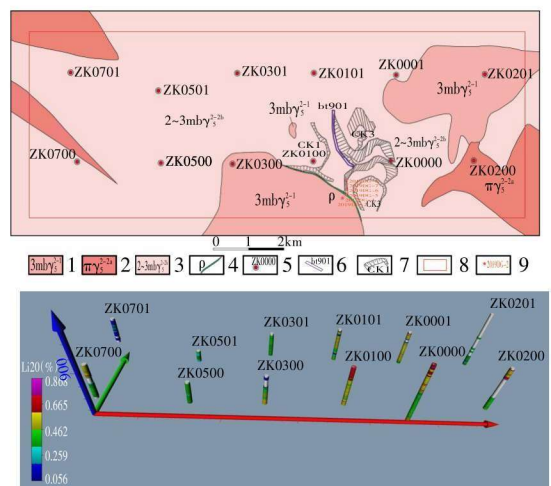


图 2 大港矿床地质图(a)和钻孔三维分布图(b)

Fig.2 Geological map of the Dagang deposit (a) and borehole 3D distribution map (b)

1.细粒黑鳞云母—白云母花岗岩;2.斑状钾长花岗岩;3.中细粒含锂云母碱长花岗岩;4.似伟晶岩脉;5.钻孔及编号;6.剥土及编号;7.采坑及编号;8.大港矿区范围;9.本次采样位置

及浅部氧化锂含量平均 0.8%, 在深部则多在 0.5%~0.3% 之间。表现出岩石钠长石化、锂云母化等蚀变矿化在岩体的顶部最强烈, 锂、铷、铯等稀有金属元素最富集, 随着岩体埋深的加深, 锂矿化逐渐减弱的特征。

3.2 岩相学特征

大港矿区内大面积出露燕山早期第二阶段第二次中细粒含锂云母碱长花岗岩、燕山早期第二阶段第一次斑状钾长花岗岩与燕山早期第一阶段细粒黑磷云母—白云母花岗岩、另见似伟晶岩脉和少量石英细脉等脉岩出露, 图 2(a)。

(1) 含锂云母碱长花岗岩是富锂花岗岩, 为含锂瓷石矿主体。细—中粒结构, 块状构造, 新鲜面多为白色, 主要矿物为石英、钾长石、锂(白)云母、钠长石, 图 3(f)、3(g)。石英, 粒径 0.3~2mm, 含量 20%~55%, 呈它形粒状, 分布较均匀; 钾长石, 粒径 0.3~1.5mm, 含量 10%~35%, 为正长石, 呈它形粒状, 泥化强, 表面较浑浊, 不同程度被钠长石、白云母交代, 部分残留呈不规则状, 分布较均匀; 锂(白)云母, 片状, 粒径 0.1~0.5mm, 含量 5%~15%, 局部含量较高, 达 35%, 根据粒径大小分两种, 一种粒径较大, 一般为 0.3~1.0mm, 可能为原生, 另一种结晶较差, 一般为 0.1~0.3mm, 多与钠长石伴生, 可能为次生; 钠长石, 半自形条柱状, 粒径大小不一, 多为 0.1~2.4mm, 含量 20%~55%, 碎裂明显, 可能有两种成因, 一种由斜长石去钙长石化作用形成, 此种结晶较好, 粒径较大, 另一种粒径较小, 普遍交代石英、钾长石。岩石蚀变中等, 局部较强, 主要为钠长石化, 次为锂云母化, 同时见有萤石化, 呈浸染状。次生矿物主要为绢云母、绿泥石、黝帘石及少量黏土矿物, 副矿物可见磷灰石、榍石、金红石等。

(2) 黑磷云母—白云母花岗岩为矿体围岩, 主要分布于矿区采坑南侧和矿区东北部, 上覆于含锂云母碱长花岗岩, 呈岩瘤状出露于地表。细粒结构, 块状构造, 新鲜面多为灰白色夹杂黑色—黄褐色, 主要矿物为石英、斜长石、钾长石、黑磷云母及钠长石, 图 3(b)、3(c)。

(3) 斑状钾长花岗岩分布于含锂云母碱长花岗岩边部或靠近黑磷云母—白云母花岗岩部位, 呈岩枝状展布。造岩矿物颗粒变粗呈似斑状—斑状, 矿物粒度达中—粗粒, 局部达 1~1.5cm, 呈似伟晶岩状。

4 岩石地球化学特征

4.1 样品采集与测试

本次研究主要选取大港矿床 CK2 采坑剥露的三个相带岩石, 即黑磷云母—白云母花岗岩、似伟晶岩和含锂云母碱长花岗岩, 图 3(a), 采集 6 件样品送至广州澳实矿物实验室进行测试分析。首先, 将样品破碎后缩分出 300g, 用玛瑙钵研磨至 75 μ m (200 目), 称取 1g 样品放置于坩埚内, 在 1200 $^{\circ}$ C 的烘箱中充分烘烤 4h; 然后, 依次加入硝酸和氢氟酸, 置于电热板上加热蒸干, 重复标样分析方法以保证准确性。采用 ME-XRF26d X 射线荧光光谱仪对岩石进行主量元素测定, 主量元素检出限为 0.01%; 采用 M61-MS81 电感耦合等离子体质谱完成对稀土

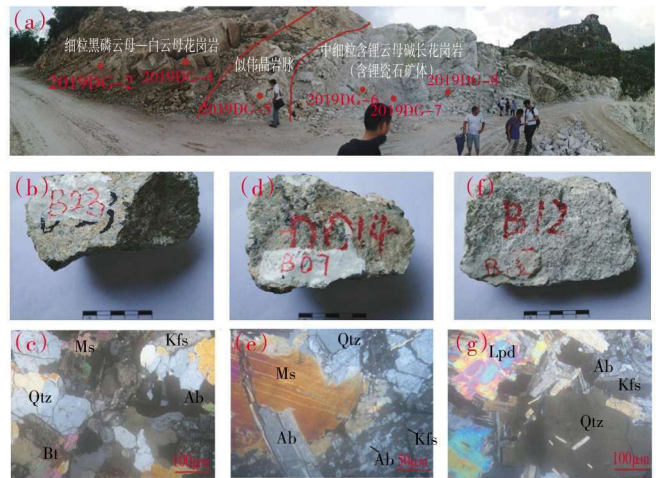


图 3 大港矿床岩性岩相学野外照片及显微照片

Fig.3 Field photos and photomicrographs of lithologic-lithofacies of Dagang deposit

(a) 细粒黑磷云母—白云母花岗岩→似伟晶岩脉→中细粒含锂云母碱长花岗岩岩相学野外特征照片; (b) 细粒黑磷云母—白云母花岗岩手标本照片; (c) 细粒黑磷云母—白云母花岗岩镜下照片; (d) 似伟晶岩手标本照片; (e) 似伟晶岩镜下照片; (f) 中细粒含锂云母碱长花岗岩手标本照片; (g) 中细粒含锂云母碱长花岗岩镜下照片

Qtz—石英; Bt—黑云母; Ms—白云母; Lpd—锂云母; Kfs—钾长石; Ab—钠长石

及微量元素的测定,稀土元素检出限为 0.01~0.5 $\mu\text{g/g}$,微量元素检出限为 0.05~10 $\mu\text{g/g}$ 。

4.2 主量元素

表 1 列出了大港矿床黑磷云母—白云母花岗岩、似伟晶岩和含锂云母碱长花岗岩等三个不同演化阶段样品的主量元素分析结果及相关参数。由表中数据可看出,在主量元素组成上具以下特征:① SiO_2 含量较高($\text{SiO}_2=71.61\%\sim 74.64\%$),在岩浆岩 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 分类图解中,均落入典型花岗岩区,图 4(a);② 富铝($\text{Al}_2\text{O}_3=13.71\%\sim 16.14\%$),铝饱和度(A/CNK 值)普遍在 1.20 以上,CIPW 标准矿物组

成中均出现刚玉分子($\text{C}>3\%$),尤其是含锂云母碱长花岗岩($\text{C}>6\%$),与 S 型花岗岩强烈富铝(A/CNK >1.10 ,CIPW 标准矿物中刚玉分子含量 $>1\%$,Chappell et al., 1992)的特征一致;③ 碱含量(ALK)中等, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.81\%\sim 7.82\%$,过碱指数(AKI 值)均低于 0.60,在 A/CNK-A/NK 图解中,数据全部落入亚碱强过铝质区域(图 4b);④ 贫锰、钛、钙、镁,分异指数(DI 值)均在 90 以上,表明岩体经历了较高分异演化,应为岩浆晚期的产物;⑤ 磷含量较高, P_2O_5 均在 0.20%以上,特别是含锂云母碱长花岗岩($\text{P}_2\text{O}_5=0.40\%\sim 0.64\%$),与 I 型和 A 型花岗质熔体

表 1 大港矿床花岗岩体主量元素含量(%)

Table 1 Major element contents (%) of the granite pluton in Dagang deposit

岩性	黑磷云母—白云母花岗岩		似伟晶岩	含锂云母碱长花岗岩		
	2019DG-2	2019DG-4		2019DG-6	2019DG-7	2019DG-8
SiO ₂	72.37	71.71	74.64	71.85	71.66	71.61
TiO ₂	0.19	0.19	0.18	0.01	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	15.25	15.21	13.71	15.60	15.74	16.14
TFe ₂ O ₃	1.76	1.93	1.96	1.12	0.80	0.72
MnO	0.03	0.03	0.03	0.15	0.13	0.12
MgO	0.36	0.35	0.31	0.04	0.01	0.01
CaO	0.36	0.29	0.42	0.51	0.66	0.49
Na ₂ O	2.61	2.77	2.66	3.17	3.79	4.03
K ₂ O	5.08	5.05	5.12	3.64	3.21	3.29
P ₂ O ₅	0.20	0.25	0.22	0.40	0.64	0.48
LOI	1.73	1.78	1.24	2.16	1.81	1.74
CaO/Na ₂ O	0.14	0.10	0.16	0.16	0.17	0.12
ALK	7.69	7.82	7.78	6.81	7.00	7.32
AKI	0.50	0.51	0.57	0.44	0.44	0.45
A/CNK	1.46	1.44	1.28	1.55	1.44	1.46
A/NK	1.56	1.52	1.38	1.70	1.62	1.58
DI	90.69	91.03	92.24	90.94	91.41	91.95
C	5.35	5.30	3.56	6.68	6.24	6.14
总量	99.94	99.56	100.49	98.65	98.46	98.64

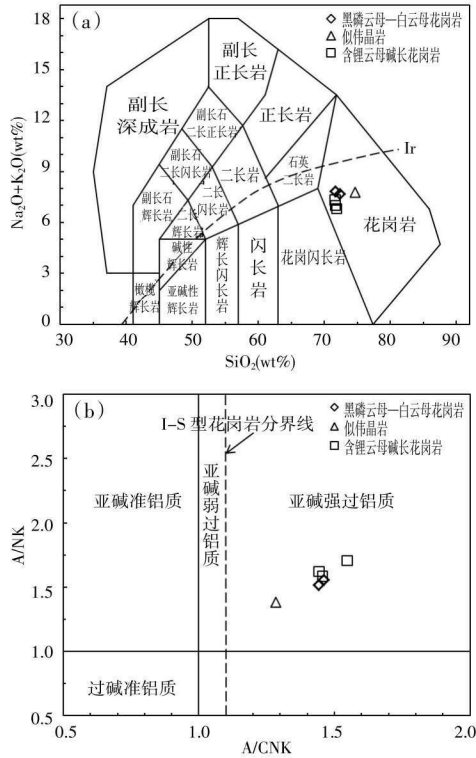


图4 大港花岗岩 $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ 分类图解(a)与 $A/CNK-A/NK$ 图解(b)

Fig.4 $SiO_2-(K_2O+Na_2O)$ classification diagram (a) and $A/CNK-A/NK$ diagram (b) of the Dagang granite pluton (a)底图(据 Middlemost, 1994);(b)底图(据 Nédélec 等, 2014)

P_2O_5 含量普遍较低(约 0.1%, Watson et al., 1981; Harrison et al., 1984)的特点差异明显。

4.3 稀土及微量元素

稀土元素组成上,含锂云母碱长花岗岩与黑磷云母—白云母花岗岩、似伟晶岩差异显著。似伟晶岩与黑磷云母—白云母花岗岩稀土及微量元素特征相似,二者稀土总量 ΣREE 为 $90.63 \times 10^{-6} \sim 135.35 \times 10^{-6}$, Eu/Eu^* 值 0.35~0.49, 呈负异常, $(La/Yb)_N$ 值 11.49~31.21(表 2), 表明轻重稀土分馏作用强烈, 球粒陨石标准化配分形式呈不规则“燕形”(图 5a); 而含锂云母碱长花岗岩稀土总量 ($\Sigma REE=1.56 \times 10^{-6} \sim 3.31 \times 10^{-6}$) 低, 中等的钕负异常 ($Eu/Eu^*=0.45 \sim 0.52$), 球粒陨石标准化配分形式呈“海鸥形”(图 5a), $(La/Sm)_N$ 值 (1.40~1.75) 和 $(Gd/Yb)_N$ 值 (1.15~2.82) 较低, 反映轻、重稀土元素本身之间的分馏较弱, 存在一定的稀土四分组效应 ($TE_{1,3}=$

1.02~1.14)。

微量元素方面,含锂云母碱长花岗岩较黑磷云母—白云母花岗岩与似伟晶岩在微量元素标准化蛛网图中(图 5b), 曲线锯齿状呈现更明显, 说明其微量元素分馏特征更强。含锂云母碱长花岗岩富集 Cs、Rb、Nb、Ta 等元素, 亏损 Ba、Sr、Ti, 具有华南典型稀有金属花岗岩的普遍特征, 且 Rb/Sr 和 Rb/Ba 比值迅速增大, 而 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值则明显减小(表 2), 表明含锂云母碱长花岗岩经历了更为强烈的分异演化(图 6)。运用锆石饱和温度计(Watson et al., 1983; Miller et al., 2003) 估算出含锂云母碱长花岗岩的锆石饱和温度为 $624.50 \sim 660.79^\circ C$, 黑磷云母—白云母花岗岩与似伟晶岩的锆石饱和温度为 $778.30 \sim 783.96^\circ C$, 表明随着岩浆分异演化程度的增高, 结晶温度呈现不断降低的趋势。

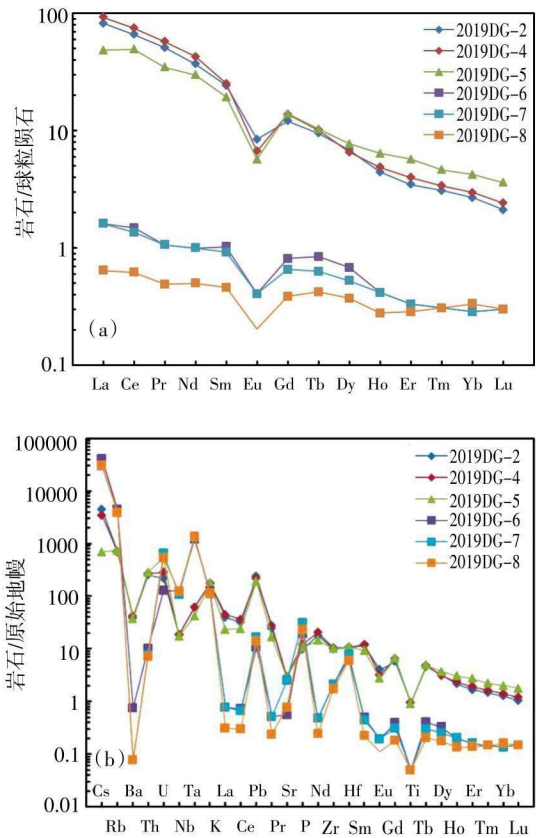


图5 大港花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线 Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a)标准化数值(据 Boynton, 1984)及微量元素原始地幔标准化蛛网图;(b)标准化数值(据 McDonough and Sun, 1995)

表 2 大港矿床花岗岩体微量及稀土元素含量($\times 10^{-6}$)Table 2 Trace and rare earth element concentrations ($\times 10^{-6}$) of the granite pluton in Dagang deposit

岩性	黑磷云母—白云母花岗岩		似伟晶岩	含锂云母碱长花岗岩		
	2019DG-2	2019DG-4		2019DG-5	2019DG-6	2019DG-7
Li	308.00	346.00	52.20	4480.00	3370.00	3020.00
Rb	426.00	414.00	442.00	2660.00	2340.00	2340.00
Cs	94.20	72.10	14.60	860.00	618.00	642.00
Nb	12.30	12.00	11.40	82.20	71.70	81.90
Ta	2.24	2.30	1.53	44.50	48.60	50.70
As	1.90	3.30	2.80	2.30	2.50	1.60
Ba	250.00	275.00	245.00	5.00	<0.5	<0.5
Be	14.50	10.95	9.47	59.00	146.00	149.50
Bi	1.90	1.87	2.18	1.58	1.37	1.02
Co	2.30	2.50	1.90	0.20	0.10	0.10
Cr	20.00	19.00	18.00	13.00	13.00	13.00
Cu	9.70	20.70	13.60	6.00	2.60	2.80
Ga	24.60	24.80	23.40	34.90	33.80	32.10
Ge	0.12	0.13	0.14	0.10	0.10	0.08
Ni	2.50	3.10	1.90	1.00	0.60	0.50
Zn	62.00	58.00	63.00	143.00	134.00	125.00
Pb	35.60	32.30	28.40	1.60	2.50	2.10
Sn	22.50	27.00	16.10	365.00	384.00	406.00
Sr	58.10	58.40	56.10	11.20	50.00	15.40
U	4.44	5.73	10.80	2.58	13.05	10.90
Th	20.00	21.60	22.70	0.80	0.61	0.56
Tl	2.11	2.13	2.07	13.35	11.85	11.95
W	19.80	6.50	8.00	37.20	22.20	21.40
Zr	103.00	110.00	106.00	22.00	22.00	18.00
Hf	3.00	3.00	3.10	1.90	2.20	1.70
Y	8.00	9.30	13.70	1.50	1.50	0.80
Rb/Sr	7.33	7.09	7.88	237.50	46.80	151.95
Nb/Ta	5.49	5.22	7.45	1.85	1.48	1.62
Zr/Hf	34.33	36.67	34.19	11.58	10.00	10.59
La	25.50	28.70	15.00	0.50	0.50	0.20

续表

岩性	黑磷云母—白云母花岗岩		似伟晶岩	含锂云母碱长花岗岩		
	2019DG-2	2019DG-4		2019DG-6	2019DG-7	2019DG-8
样号	2019DG-2	2019DG-4	2019DG-5	2019DG-6	2019DG-7	2019DG-8
Ce	53.20	60.50	39.90	1.20	1.10	0.50
Pr	6.22	6.99	4.23	0.13	0.13	0.06
Nd	22.20	25.60	17.90	0.60	0.60	0.30
Sm	4.73	4.92	3.78	0.20	0.18	0.09
Eu	0.62	0.49	0.42	0.03	0.03	<0.03
Gd	3.13	3.56	3.61	0.21	0.17	0.10
Tb	0.45	0.48	0.49	0.04	0.03	0.02
Dy	2.21	2.11	2.49	0.22	0.17	0.12
Ho	0.32	0.35	0.46	0.03	0.03	0.02
Er	0.73	0.84	1.20	0.07	0.07	0.06
Tm	0.10	0.11	0.15	0.01	0.01	0.01
Yb	0.56	0.62	0.88	0.06	0.06	0.07
Lu	0.07	0.08	0.12	0.01	0.01	0.01
(La/Yb)N	30.70	31.21	11.49	5.62	5.62	1.93
(La/Sm)N	3.39	3.67	2.50	1.57	1.75	1.40
(Gd/Yb)N	4.51	4.63	3.31	2.82	2.29	1.15
Eu/Eu*	0.49	0.36	0.35	0.45	0.52	0.48*
∑REE	120.04	135.35	90.63	3.31	3.09	1.56
TE1,3	1.07	1.02	1.02	1.14	1.02	1.08
TZr(°C)	778.30	783.96	780.76	660.79	660.79	624.50

5 讨论

5.1 花岗岩成因与演化

20世纪70年代以来,国际上广泛采用按物质来源进行花岗岩成因分类研究,即划分为I型、S型花岗岩(Chappell et al., 1974)、A型(Collins et al., 1982)和M型花岗岩(Pitcher, 1983)。大港矿床三个不同相带岩石铝饱和指数(A/CNK值)均在1.20以上,而碱含量相对偏低,过碱指数(AKI值)基本低于0.60,由A/CNK-A/NK图解,图4(b)判别为亚碱强过铝质S型花岗岩,且CIPW标准矿物计算组分

中均出现刚玉分子($C>3\%$),在Eu/Eu*-A/CNK-刚玉图解图7(a)内同样集中于S型花岗岩区。

强过铝质花岗岩被认为是地壳中富铝质沉积物部分熔融的产物,其CaO/Na₂O值可作为判断源区成分的重要指标之一(Chappell et al., 1992; Sylvester, 1998; Patio, 1998)。实验研究表明,由富黏土矿物、贫斜长石(5%)的泥质岩部分熔融生成的强过铝花岗岩的CaO/Na₂O比值小于0.3,而由贫黏土矿物、富斜长石(25%)的砂屑岩部分熔融所生成的强过铝花岗岩,则CaO/Na₂O比值大于0.3(Sylvester, 1998)。大港花岗岩CaO/Na₂O比值仅为0.10~0.17,在Al₂O₃/

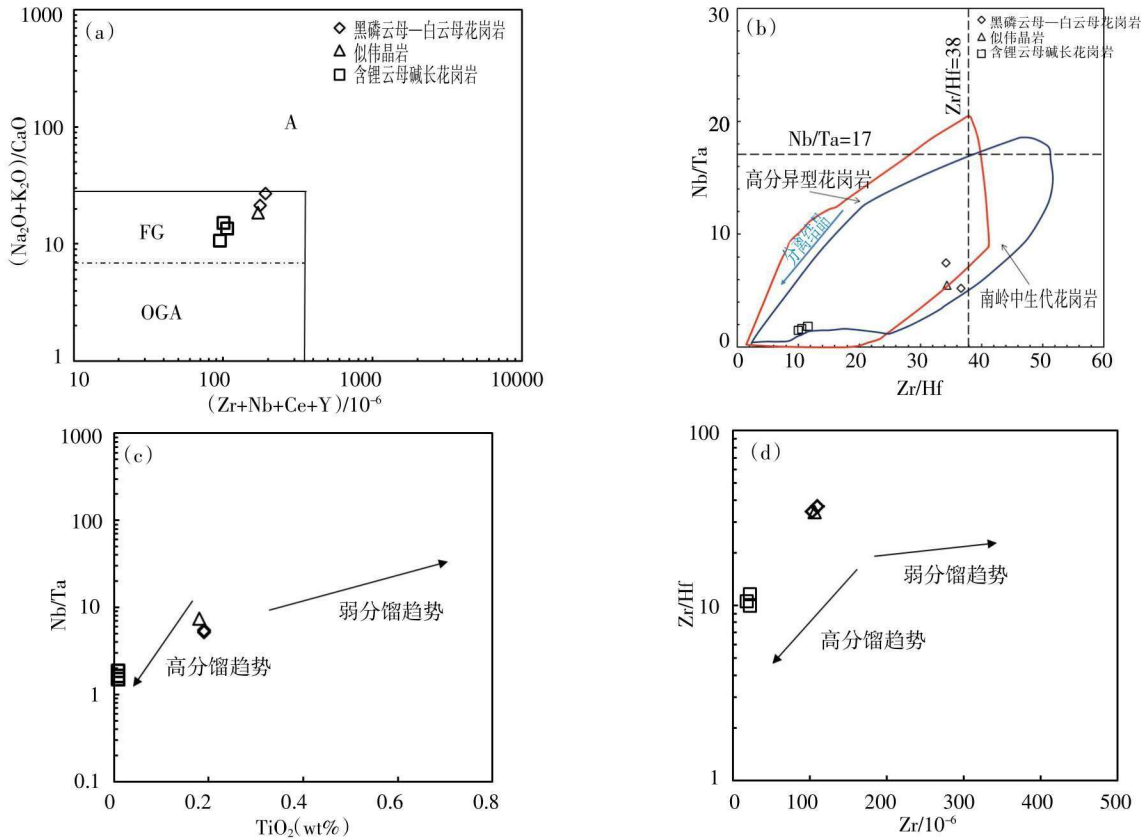


图 6 大港花岗岩分异程度指示图

Fig.6 Indicators of granite differentiation degree of the Dagang deposit

A—A 型花岗岩; FG—分异型 M、I、S 型花岗岩; OGA—未分异型 M、I、S 型花岗岩

(a)底图(据 Eby, 1990); (b)底图(据秦程, 2018); (c)和(d)底图(据 Gao 等, 2020)

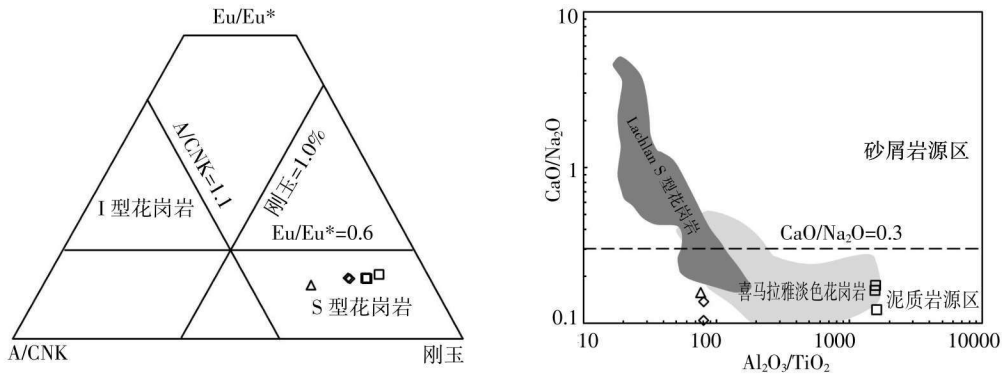


图 7 大港花岗岩成因类型和岩浆源区判别图

Fig.7 Genetic type and magma source discrimination of the Dagang granite pluton

(a)底图(据王春英等, 2009); (b)底图(据张永明等, 2019)

TiO_2-CaO/Na_2O 图解, 图 7(b)中, 样品点全部落入泥质岩源区。马东升(2008)认为, 华南变质基底对比中国东部其他地区, 具有最高的 W、Sn、Nb、Ta 等成矿元素丰度, 且泥质沉积岩通常富集 Li、F、P 等元素。因此, 区内变质泥质岩的部分熔融可以为甘坊

岩体成矿提供重要的物质基础(包括成矿元素 Ta、Nb、Li 等及矿化剂元素 F、P 等)。

黄小龙等(1998)研究指出, 华南稀有金属岩体为富氟长英质体系, 根据全岩 P_2O_5 含量的多寡可进一步将华南富氟花岗岩分为高磷亚类 ($P_2O_5>0.4\%$)

和低磷亚类 ($P_2O_5 < 0.1\%$) (London, 1992, 1993; Taylor, 1992)。高磷亚类以低硅、强过铝和低的稀土总量 (ΣREE) 为特征, 通常经历两阶段演化: 岩浆的结晶分异阶段及随后残余流体—熔体相互作用阶段, 第二阶段通常以较强的四分组效应 ($TE1, 3 > 1.10$), 较低的 $K/Rb (< 50)$ 、 $Zr/Hf (< 25)$ 以及 $Nb/Ta (< 5)$ (Dostal et al., 2000; Irber, 1999) 等地球化学特征为标志。处于演化晚期的含锂云母碱长花岗岩 $K/Rb = 11.36 \sim 11.67$, $Zr/Hf = 10.00 \sim 11.58$, $Nb/Ta = 1.48 \sim 1.85$ (表 2), 这些特征表明含锂云母碱长花岗岩在经历充分的结晶分异演化之后, 晚期还经历了流体—熔体强相互作用。研究认为, 岩体的高程度分异演化及晚期流体—熔体强相互作用是华南花岗岩型稀有金属矿床的重要成矿机制 (罗照华, 2011)。

5.2 大地构造与成矿

早期认为强过铝质花岗岩是在陆—陆碰撞过程中挤压背景下, 地壳加厚而发生部分熔融的产物 (Pitcher, 1983; Pearce et al., 1984; Harris et al., 1986)。但随后的研究发现, 大量原来认为是同碰撞的强过铝质花岗岩却是后碰撞期的产物 (Sylvester, 1998), 形成于碰撞高峰期后的岩石圈伸展背景 (Williamson et al., 1996; Forster et al., 1999; Kalsbeek, 2001), 在碰撞后阶段的前期, 造山带及其邻区可能仍处于挤压应力状态, 持续的陆内俯冲会使区域地壳继续加厚并导致区域重力均衡隆升, 被构造卷入深部地壳的泥砂质沉积岩在加热后的抬升减压过程中发生脱水部分熔融, 形成强过铝质花岗岩 (杨坤光等, 1997; Turner et al., 1999)。众多文献认为, 南岭中生代花岗岩的成因主要是地壳物质的部分熔融, 地幔物质参与较少, 而大规模成矿作用产出的构造环境, 从挤压—伸展转折向后碰

撞的板块抬升、拉张环境呈现出多阶段矿化特征 (谭俊等, 2007; 王莉娟等, 2013; 郭春丽等, 2014)。由 $Eu/Eu^* - (La/Yb)_N$ (图 8a) 与 $SiO_2 - MgO$ (图 8b) 图解可知, 大港花岗岩属于增厚下地壳部分熔融所形成的壳型花岗岩; R1-R2 (图 8c) 图解中, 样品点分布于同碰撞和后碰撞之间的区域, 暗示其可能形成于同碰撞或后碰撞早期阶段, 同时 $SiO_2 - \lg[CaO/(Na_2O + K_2O)]$ (图 8d) 构造环境判别图解显示出大港花岗岩体主要形成于伸展构造背景。

赵一鸣等 (2004) 认为, 华南地区的花岗岩型稀有金属矿床在大地构造上主要分布在湘赣桂粤造山带内。造山运动使得地壳硅铝层的厚度增厚, 加厚的硅铝质地壳经过多次熔融形成富含成矿物质的花岗岩岩浆。南岭地区中生代构造活动以断裂运动为主, 区内由西北至东南形成众多北东或北东东向断裂, 断裂构造运动主导了地壳部分熔融以及岩浆侵位机制。经过多幕次的构造岩浆活动, 最终使得 Ta、Nb、Li 等成矿元素在复式花岗岩体的演化晚期发生矿化。虽然在同一造山带内, 稀有金属的矿

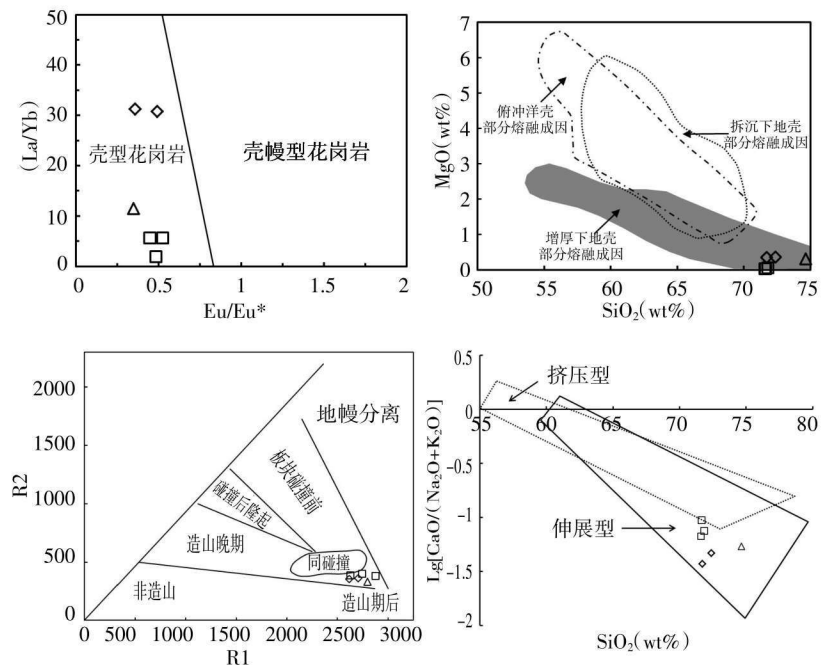


图 8 大港花岗岩构造环境判别图解

Fig.8 Tectonic discrimination diagram of the Dagang granites
(a)底图(据胡军等, 2017);(b)底图(据刘晓阳等, 2020);(c)底图(据 Batchelor 等, 1985);(d)底图(据 Brown, 1982)