

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.591



广东文光岭铅锌铜多金属矿花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其成因

欧阳志侠¹, 楚克磊², 陈友良^{3*}, 吴晓东¹, 杨胜虎¹, 汪汝澎¹, 刘东宏¹, 汪礼明¹

1. 广东省有色金属地质局, 广东广州 510080

2. 中国地质科学院, 北京 100037

3. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

摘要:广东省文光岭矿床是云开地区近年来新发现的铅锌铜多金属矿。以文光岭花岗闪长岩作为研究对象, 对其开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年和地球化学特征研究。获得其锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 同位素加权平均年龄为 $165.7 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ($n=18$, $\text{MSWD}=3.1$)。花岗闪长岩属于准铝质 I 型花岗岩, SiO_2 含量在 $64.11\% \sim 66.64\%$ 之间, Al_2O_3 含量为 $14.9\% \sim 15.57\%$, MgO 含量在 $1.39\% \sim 1.61\%$ 之间, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量介于 $6.5\% \sim 7.21\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.25 \sim 2.74$, 铝饱和指数 $\text{A}/\text{CNK} = 0.93 \sim 1.11$, 轻、重稀土元素分馏作用明显, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 13.03 \sim 17.83$, 具有弱的负铈异常 (δEu 为 $0.70 \sim 0.88$), HFSE 和 LILE 分异明显, 富集 Rb、Th、U、K 等元素, 亏损 Nb、Ta、P 和 Ti 等元素。结合区内已有资料, 认为文光岭铅锌铜多金属矿床的形成与古太平洋板块的俯冲作用密切相关。

关键词:文光岭铅锌铜多金属矿; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 云开地区。

中图分类号: P581; P597

文章编号: 1000-2383(2019)04-1327-11

收稿日期: 2017-12-05

Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Petrogenesis of Granodiorite from Wenguangling Pb-Zn-Cu Polymetallic Deposit in Guangdong Province

Ouyang Zhixia¹, Chu Kelei², Chen Youliang^{3*}, Wu Xiaodong¹, Yang Shenghu¹, Wang Rupeng¹, Liu Donghong¹, Wang Liming¹

1. *Geology Bureau for Nonferrous Metals of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China*

2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

3. *College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*

Abstract: The recently discovered Wenguangling deposit is a Pb-Zn-Cu polymetallic deposit, located in the Yunkai area. It was firstly investigated of the granodiorites from the Wenguangling deposit by integrating in situ zircon U-Pb dating and geochemical analysis. Eighteen zircons from sample WGL-02 yield excellently concordant results with a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of $165.7 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ($n=18$, $\text{MSWD}=3.1$). The Wenguangling granodiorites belong to metaluminous I-type granite. Their SiO_2 and Al_2O_3 contents are $64.11\% - 66.64\%$ and $14.9\% - 15.57\%$, respectively. The MgO contents are between 1.39% and 1.61% . The alkali ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) contents range from 6.5% to 7.21% , with $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios from 1.25 to 2.74. Their aluminum indexes (A/CNK ratios) are $0.93 - 1.11$. The granodiorites are also characterized by noteworthy fractionation between LREE and

基金项目:中国地质调查局地质调查工作项目 (Nos. 12120114015801, 1212011120826)。

作者简介:欧阳志侠(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域地质调查与矿产勘查等工作。ORCID: 0000-0003-4473V3479. E-mail: oyzxs-nake@163.com

* **通讯作者:**陈友良, ORCID: 0000-0001-6844-3105. E-mail: chenyouliang09@cdut.cn

引用格式:欧阳志侠, 楚克磊, 陈友良, 等, 2019. 广东文光岭铜铅锌多金属矿花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其成因. 地球科学, 44(4): 1327-1337.

HREE ($(La/Yb)_N = 13.03 - 17.83$), with weak negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.70 - 0.88$). The trace element analyses show clear fractionation between HFSE and LILE, and the granodiorites are strongly enriched in Rb, Th, U and K but depleted in Nb, Ta, P and Ti. Based on the geochemistry, zircon U-Pb dating of the Wenguangling granodiorite and regional tectonic evolution, it is inferred that the formation of the Wenguangling Pb-Zn-Cu polymetallic deposit is closely associated with the subduction of the Paleo-Pacific plate.

Key words: Wenguangling Pb-Zn-Cu polymetallic deposit; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; Yunkai area.

0 引言

云开地区位于钦杭成矿带与东南沿海成矿带的

交汇部位, 构造-岩浆演化复杂, 成矿条件优越, 具有众多的大型-超大型多金属矿床(图 1; 郑伟, 2016). 这些多金属矿床及与之形成密切相关的岩浆

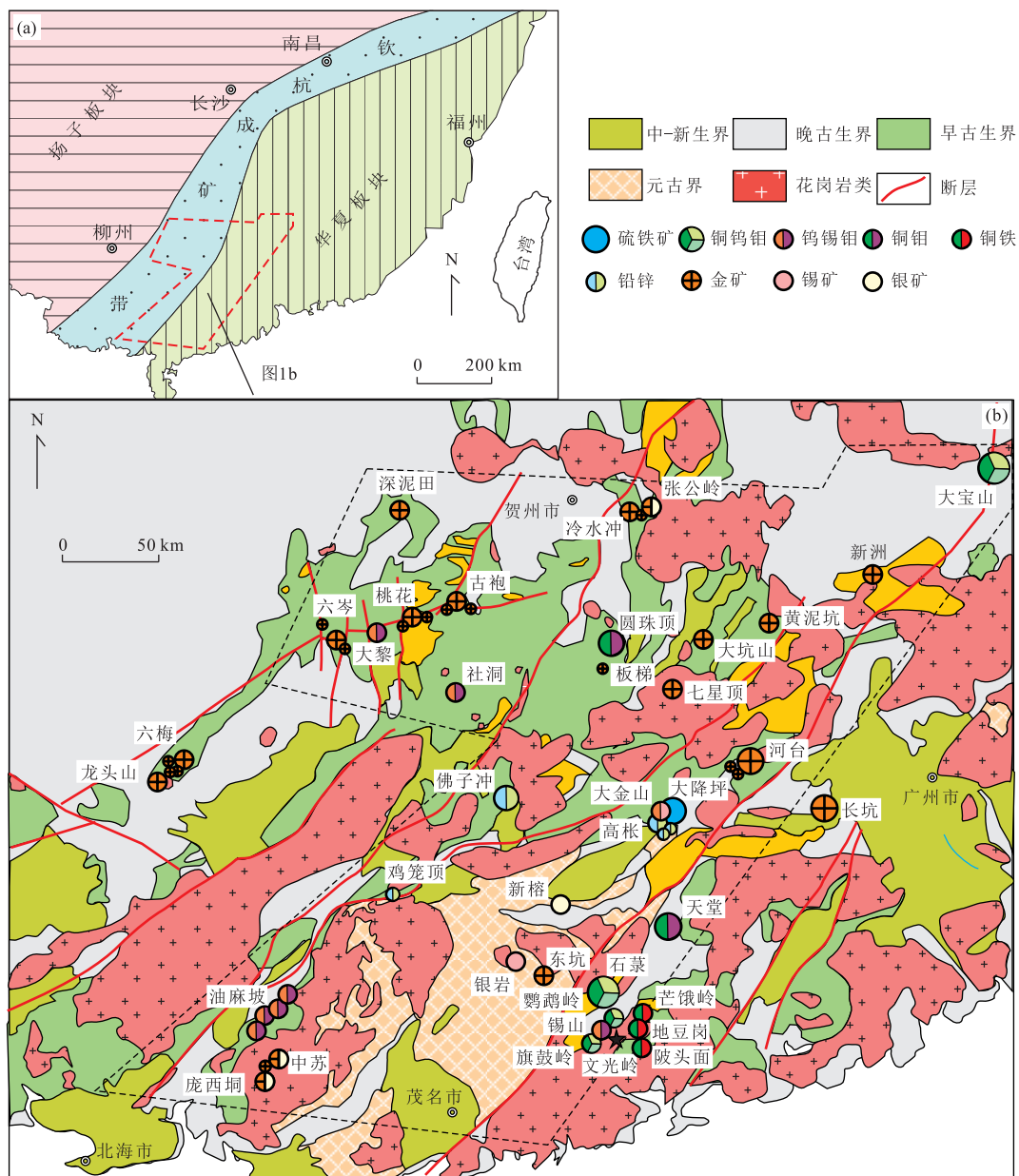


图 1 云开地区地质、矿产略图

Fig.1 Geological and mineral sketch map of the Yunkai area

改自毛景文等(2011)和楚克磊(2013)

活动主要集中发生在中生代,对应于中国东部中生代成岩成矿大爆发的地质事件。近年来,中国东部中生代成岩成矿大爆发过程以及规律一直是备受关注和需要解决的问题。云开地区矿床类型及矿化元素多样、成矿规律复杂,不同矿化元素矿床多集中发育在盆地边缘,展现出典型的盆地控矿特征,而且均与花岗质岩石有着密切的关系(郑伟等,2015;郑伟,2016)。如:阳春盆地集中发育了芒鹅岭、陂头面、地豆岗等铜铁矿床,石藁铜钼矿床、天堂铜铅锌多金属矿床、鸚鵡岭钨锡钼多金属矿床等;位于云开地区中部偏北的罗定盆地产出有大金山钨锡多金属矿床、大降坪硫铅锌矿床、高枋铅锌矿床、九曲岭钨矿等;怀集盆地周缘有圆珠顶铜钼矿、黄泥坑金矿等;玉林盆地有油麻坡钨钼矿、佛子冲铅锌矿等;三水盆地发育有富湾超大型银矿、长坑金矿、横江铅锌矿、南蓬山锰矿和茶山铅锌矿等。近年来,区内找矿勘查工作取得了重大突破,不仅表现为区域优势矿床—铜金多金属矿床的深部增储,而且发现了一批钨多金属矿床,如社垌斑岩—矽卡岩—石英脉型钨钼矿、大金山钨锡矿和三甲冲钨钼矿等。另外还探明了多个大中型铜钨多金属矿床,如大宝山铜钨多金属矿和鸚鵡岭钨多金属矿等(毛景文等,2011;刘莎等,2012;王磊等,2012;毛伟等,2013;郑伟等,2013a,2013b,2015;Zheng *et al.*,2017a)。最近又在邻近的石藁铜多金属矿发现了多处厚大的钨矿体和钨铜共生矿体(郑伟,2016)。以上表明区内具有巨大的成矿潜力和找矿前景。

文光岭作为阳春盆地新发现的铅锌铜多金属矿床,其科学研究一片空白,一定程度上限制了对该矿床进一步的找矿勘查工作。本文选择文光岭花岗闪长岩为研究对象,在通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学确定其精确侵位时代的基础上,通过岩相学及地球化学等方面的综合研究,探讨岩石成因及其构造背景。这不仅对研究矿床成岩成矿时限和矿床成因具有理论和现实意义,还可为区域构造演化提供新的参考资料。

1 区域地质背景及岩体特征

云开地区大地构造位置位于华夏地块与扬子板块的交接地带,是一个以元古代混合花岗岩、混合岩为核心的古隆起,构造—岩浆演化复杂,成矿条件优越(蔡明海等,2002;郑伟,2016)。基底由元古代结晶基底和早古生代褶皱基底组成,盖层为晚古生代和

中、新生代沉积岩。区内褶皱和断裂发育,形成以 NE 向为主的构造格局。褶皱和断裂广泛发育,不同时期的褶皱形态有所不同:加里东期褶皱属基底褶皱,主要分布于桂中拗陷和云开隆起等地,总体呈 NE 向延伸;印支期褶皱属盖层褶皱,总体呈 NE 向延伸为主,主要分布于粤中拗陷、钦防拗陷、廉江和罗定等地;燕山期褶皱由侏罗系—白垩系组成,分布于中、新生代盆地,褶皱轴向以 NNE 向为主,其与盆地展布方向一致。断裂以 NNE-NE 向为主,也有近 NS 向、NW 向和 EW 向的断裂。NNE-NE 向断裂主要发育于云开隆起边缘,是区内主要的控岩控矿构造,包括石圭—罗定—广宁、吴川—四会和博白—岑溪断裂(郑伟,2016)。

云开地区岩浆活动频繁,按时代由老至新可划分为晋宁期、加里东期、海西西期、印支期和喜马拉雅期六期。其中燕山期最为强烈,且分布广泛,既有重熔型花岗岩,也有同熔型中酸性岩。与该期岩浆活动密切相关的成矿作用规模大、强度高、矿种多、矿床类型复杂,也是区内成矿作用最为强烈的时期。目前已发现多金属矿种达 20 余种(安国英,2002),其中金银矿床(点)约 300 个、铜铅锌矿床点 450 个(梁约翰等,1998),矿床类型主要包括石英脉型金矿,构造蚀变岩型 Au、Ag、Pb、Zn 矿床,斑岩型 Au、Cu、Mo 矿床,矽卡岩型 W、Mo 矿床,(喷流)沉积改造型 Pb、Zn 矿床和热卤水层控改造型 Cu、Pb、Zn 矿床。云开地区这些多金属矿床及与之形成密切相关的岩浆活动主要集中发生在中生代,但也存在元古代海底喷流型铜多金属矿床。此外,最近的研究表明区内还存在加里东期的斑岩—矽卡岩型铜钨钼多金属矿床(陈懋弘等,2012,2015;李巍等,2015)。郑伟(2016)将云开地区主要多金属矿床划分为 3 个成矿系列:新元古代海底喷流沉积型铜锌多金属矿床成矿系列、加里东期(430~440 Ma)斑岩—矽卡岩—石英脉型钨钼铜金多金属矿床成矿系列和燕山期与花岗岩有关的铜铅锌钨锡多金属矿床成矿系列,后者又可以进一步分为燕山早期(145~170 Ma)斑岩—矽卡岩型铜钼(金)多金属矿床成矿亚系列和燕山晚期(80~110 Ma)斑岩—蚀变破碎带型铜金银钨锡多金属矿床成矿亚系列。

阳春盆地是云开隆起区在印支期复向斜基础上发育而成的局部断陷盆地,属于典型的构造盆地(沈睿文等,2010;郑伟等,2012)。文光岭铅锌多金属矿是广东省有色金属地质局近年来在阳春盆地新发现的多金属矿床(图 1)。矿区内地层出露有早侏罗系金

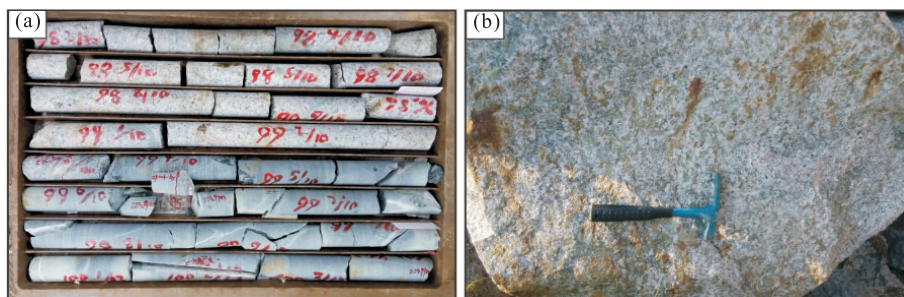


图 2 广东省文光岭花岗闪长岩野外照片

Fig.2 Field photos of the Wenguangling granodiorites in Guangdong Province

鸡组 and 第四系, 早侏罗系金鸡组主要岩性为紫红色粉砂岩和细粒长石石英砂岩。断裂发育, 大致分成 3 组, 即 NW、NE 和 NNW 向断裂, 其中以 NW 向断裂为主。此外, 文光岭花岗闪长岩体中尚发育有多组裂隙, 纵横交叉成网状产出。文光岭矿区金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和赤铁矿等。脉石矿物以石英、绿泥石、绿帘石、长石和高岭土等为主。矿石结构以粒状结构、交代结构、充填结构和固溶体分离结构为常见。矿石构造主要包括块状构造、脉状及浸染状构造等。区内围岩蚀变种类较多, 类型较复杂, 主要为硅化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化和磁铁矿化等。矿区北部有近 EW 向的构造角砾岩带, 宽约 1.0~1.5 m, 稳定延伸长达 200 余米, 地表已氧化成铁帽, 分析其铅锌含量达 2% 以上, Ag 含量 1 000 g/t, 表明具有较好的找矿前景。

本文首次对该矿床的成矿岩体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的厘定以及地球化学特征的分析。文光岭岩体为呈岩株状产出的中粗粒花岗闪长岩(图 2), 具半自形粒状结构, 块状构造。矿物成分主要有石英(~25%)、斜长石(~45%)、钾长石(15%~20%)、少量的角闪石(~10%)和黑云母(~5%)。石英呈不规则粒状; 斜长石和钾长石呈半自形板柱状, 双晶普遍发育; 角闪石为普通角闪石; 黑云母为片状集合体, 部分发生绿泥石化。副矿物主要有磷灰石、磁铁矿、锆石和榍石等。

2 分析方法

文光岭花岗闪长岩样品经破碎、研磨至 60~80 目的粉末, 然后通过淘选、磁选等分离步骤后, 在双目镜下挑选出晶形完好的锆石颗粒。用环氧树脂将挑选出来的锆石制成靶, 并对靶表面进行抛光。对锆石颗粒拍摄透射光、反射光及阴极发光(CL)图像,

以观察锆石内的包裹体结构, 帮助选择合适的点位。

锆石原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 定年在广州地球化学研究所同位素国家重点实验室进行。分析所使用的是美国 Resonetics 公司生产的 Resolution M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型的 ICP-MS 联机的 LA-ICPMS。激光能量为 80 mJ, 束斑直径为 31 μm , 频率为 8 Hz, 载气为 He-Ar 混合气。所剥蚀样品通过本系统所特有的信号平滑系统后进入 ICPMS 进行测试。每进行 5 个样品分析就分析两个年龄标样(标准锆石 TEMORA), 每分析 10 个样品就分析两个微量元素标样 NIST 610。年龄计算采用 ISOPLOT(Ludwig, 2003)。

全岩主量、微量及稀土元素测试工作由澳实分析检测(广州)有限公司完成。全程均为无污染操作。全岩主量元素采用 X 射线荧光光谱法测定, 首先将样品粉末熔制成玻璃片, 然后采用 3080E 型 X 射线荧光光谱仪分析, 该分析法具有制样简单、分析速度快、结果重现性好以及准确度高等优点。微量及稀土元素采用 ICP-MS 方法测定, 所用仪器为 Agilent 7500a 型等离子质谱仪。首先将试样加入到偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂中, 混合均匀, 在 1 025 $^{\circ}\text{C}$ 以上的熔炉中熔化。熔液冷却后, 用硝酸、盐酸和氢氟酸定容, 再用等离子体质谱仪分析。实验获得数据的相对标准偏差小于 5%。

3 测试结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

文光岭花岗闪长岩 WGL-02 样品(111 $^{\circ}$ 42'29" E, 22 $^{\circ}$ 02'01"N)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果见附表 1。根据数据所做的 U-Pb 谐和图以及采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄进行加权平均值计算的年龄图见图 3。本次测试共选择了 18 粒锆石, 分析了 18 个点。从花岗闪长岩中选取的锆石颗粒大多晶形较好、环带

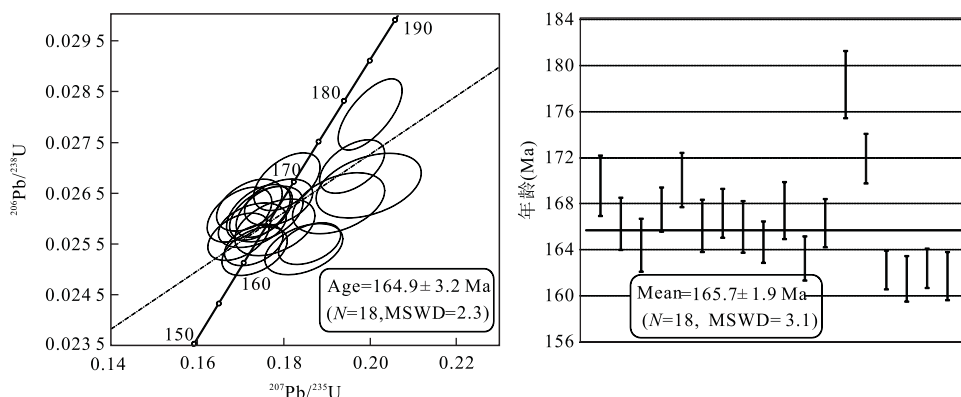


图 3 广东省文光岭花岗岩长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谱图

Fig.3 Zircon U-Pb concordia diagram and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age spectra for the Wenguangling granodiorite in Guangdong Province

表 1 广东省文光岭花岗岩长岩体的主量(%)、微量和稀土元素(10^{-6})组成

Table 1 Major (%), trace (10^{-6}) elements and REE (10^{-6}) compositions of the Wenguangling granodiorite in Guangdong Province

样品	YGL-01	YGL-02	HB-01	HB-02	样品	YGL-01	YGL-02	HB-01	HB-02
SiO ₂	66.25	64.11	66.28	66.64	Sr	420	292	468	453
TiO ₂	0.46	0.50	0.55	0.50	Zr	155	151	173	140
Al ₂ O ₃	15.42	15.57	14.90	14.94	Hf	4.4	4.2	5.1	3.9
Fe ₂ O ₃	4.13	3.85	4.77	4.35	Ti	2 757.7	2 997.5	3 297.3	2 997.5
MnO	0.10	0.24	0.11	0.08	La	46.1	52.7	46.9	40.5
MgO	1.41	1.39	1.61	1.42	Ce	66.4	83.3	79.2	69.3
CaO	2.51	3.51	3.97	3.75	Pr	7.08	8.67	8.34	7.45
Na ₂ O	2.94	1.93	2.89	2.96	Nd	24.3	29.2	29.3	25.3
K ₂ O	4.15	5.28	3.61	4.03	Sm	4.40	5.13	5.51	4.82
P ₂ O ₅	0.14	0.18	0.18	0.17	Eu	1.23	1.14	1.29	1.24
LOI	1.84	2.61	0.96	0.56	Gd	3.94	4.63	4.51	3.76
Total	99.43	99.25	99.90	99.48	Tb	0.58	0.69	0.72	0.58
Be	2.2	3.0	2.3	2.1	Dy	3.49	3.82	3.96	3.31
Sc	7	8	7	7	Ho	0.65	0.78	0.74	0.75
V	73	81	83	77	Er	1.99	2.07	2.34	1.96
Cr	23	32	24	21	Tm	0.31	0.29	0.35	0.31
Co	8	8	8	8	Yb	2.16	2.12	2.55	2.23
Ni	4	5	5	5	Lu	0.32	0.32	0.36	0.29
Cu	<1	4	<1	1	Y	17.5	20.9	21.4	19.6
Zn	37	73	46	34	K	34 450.4	43 830.9	29 967.7	33 454.2
Ga	19.0	17.7	18.6	17.7	Ta	0.9	1.0	1.1	0.9
As	5	6	9	9	P	611.04	785.63	785.63	741.98
Rb	218	351	187	202	Th	30	30	30	30
Ba	613	656	521	627	U	7.35	9.55	12.55	7.81
Nb	10.5	10.8	12.5	11.1					

明显,并且是避开包裹体和裂纹的部位。

研究表明,不同成因的锆石其 U、Th 含量与 Th/U 比值也有所不同。一般情况下,岩浆锆石的 Th、U 含量较高, Th/U > 0.5, 且 U 和 Th 之间具有明显的正相关关系;而变质成因锆石的 Th、U 含量低,且 Th/U < 0.1 (Hoskin and Black, 2002; Zheng *et al.*, 2018)。典型的岩浆锆石 Th/U 集中分布于 0.3~0.7 之间 (Belousova *et al.*, 2002)。本次所有分

析点的 U 含量分布在 $721 \times 10^{-6} \sim 1 503 \times 10^{-6}$ 的范围内,平均值为 $1 031 \times 10^{-6}$; Th 含量分布在 $515 \times 10^{-6} \sim 1 236 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 701×10^{-6} ; Pb 含量分布在 $24 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 34×10^{-6} ; Th/U 介于 0.37~0.67, 显示了典型的岩浆锆石特征 (Hoskin and Black, 2002)。所有测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和度非常高,在锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 协和图上,它们聚集在一个较

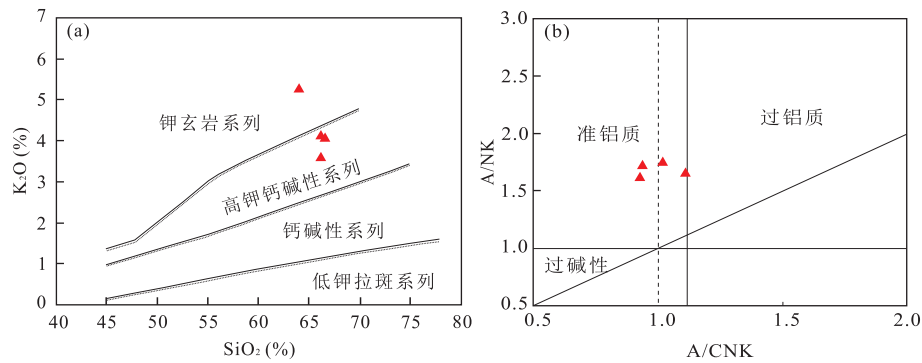


图 4 广东省文光岭花岗闪长岩体的 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解(a)及 $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$ 图解(b)

Fig.4 SiO_2 versus K_2O (a) and A/CNK versus A/NK (b) plots for the Wenguangling granodiorites in Guangdong Province
据 Rickwood(1989)和 Peccerillo and Taylor(1976)

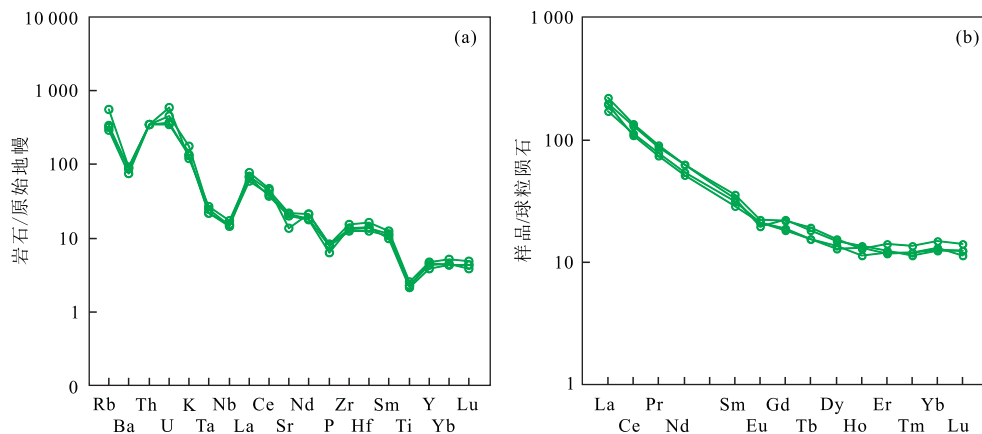


图 5 广东省文光岭花岗闪长岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)及稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(b)

Fig.5 Primitive mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) diagrams of the Wenguangling granodiorites in Guangdong Province

据 Sun and McDonough (1989)

小的范围内,这一特征表明锆石的 U-Pb 体系基本保持封闭状态,因此测年结果的可信度较高,其加权平均年龄值为 $165.7 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 3.1$; 图 3)。结合锆石元素特征分析,这一年龄代表了花岗岩的结晶年龄,说明其为中侏罗世晚期的岩浆侵入活动的产物。

3.2 地球化学特征

文光岭花岗闪长岩岩石地球化学测试数据列于表 1。文光岭花岗闪长岩的 SiO_2 含量在 $64.11\% \sim 66.64\%$ 之间,平均为 65.82% ; TiO_2 含量在 $0.46\% \sim 0.55\%$ 之间,平均为 0.5% ; Al_2O_3 含量在 $14.9\% \sim 15.57\%$ 之间,平均为 15.21% ; MgO 含量在 $1.39\% \sim 1.61\%$ 之间,平均为 1.46% ; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量介于 $6.5\% \sim 7.21\%$,平均为 6.95% ; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 $1.25 \sim 2.74$,平均为 1.69 ; 铝饱和指数 (A/CNK) 介于 $0.93 \sim 1.11$ 。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解上

(图 4a)文光岭岩体落在钾玄质系列和高钾钙碱性系列区域。在 $\text{A/NK} - \text{A/CNK}$ 图解上(图 4b)均落在准铝质范围内。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 5a)上,花岗闪长岩体显示富集大离子亲石元素(LILE),如 Rb、Th、U、K 等元素呈现出明显的正异常;亏损高场强元素(HFSE),如 Nb、Ta、P、Ti 等元素出现明显的负异常,与俯冲带的岩石地球化学特征相似(Liégeois *et al.*, 1998; Kelemen *et al.*, 2003)。花岗闪长岩的稀土总量($\sum \text{REE}$)为 $161.8 \times 10^{-6} \sim 194.86 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 10.98 \sim 12.24$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 13.03 \sim 17.83$,显示轻、重稀土元素分馏作用明显,富集轻稀土元素。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(图 5b)上,呈现右倾型且具有弱的负铕异常(δEu 为 $0.70 \sim 0.88$)。

4 讨论

4.1 区内岩浆侵入序列及成矿作用

本文首次对文光岭铅锌铜多金属矿床花岗闪长岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年,锆石从形态、振荡环带结构及元素含量均显示出岩浆成因的特点,因此锆石 U-Pb 年龄可代表该岩体的岩浆结晶年龄(Zheng *et al.*, 2017b).该锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 同位素加权平均年龄为 165.7±1.9 Ma,故其侵位年代可精确地限定于中生代燕山晚期,即处于华南地区中生代三次成矿高峰(毛景文等, 2004, 2007, 2008; 华仁民等, 2005; 郑伟等, 2012, 2017; Zheng *et al.*, 2018)之一的中侏罗世.值得一提的是,最近在阳春盆地新发现了多个同时期的多金属矿床,如旗鼓岭铜钼钨多金属矿和陂头面铜铁多金属矿等(郑伟等, 2015, 2018a),均展现出矿化规模大、品位富的特点,具有很好的找矿前景.

4.2 岩石成因类型

花岗岩成因类型的判定是花岗岩研究最重要的基础问题之一,其准确判定需要结合矿物组成及地球化学特征等综合分析.目前最常用的花岗岩成因分类方案是由 Chappell and White(1974)提出的 I-S-A-M 四分方案,而 M 型较为少见,如蛇绿岩套中的大洋斜长花岗岩,因此自然界中花岗岩的成因类型主要为 S 型、I 型和 A 型.从矿物组成特征上,堇青石、白云母、角闪石和碱性铁镁矿物被认为是判断上述三大类型花岗岩有效的矿物学标志(Miller, 1985; 吴福元等, 2007; 杨钢等, 2015; 孟庆丰等, 2016; Zheng *et al.*, 2017a).一般来说,过铝质矿物(如白云母、堇青石、电气石等)是 S 型花岗岩的特征矿物,而角闪石被认为是 I 型花岗岩的标型特征矿物.文光岭花岗闪长岩中产出有角闪石矿物,且 P₂O₅ 含量为 0.14%~0.18%,明显不同于 S 型花岗岩常具有较高的 P₂O₅ 含量(>0.20%; Chappell, 1999)的特征.另外,铝饱和指数 A/CNK 位于 0.93~1.1 之间,也不同于典型 S 型花岗岩的比值(>1.1; Chappell and White, 1974, 1992).在微量元素蛛网图中,花岗闪长岩富集大离子亲石元素,相对亏损高场强元素,具有显著的 Nb、Ti、P 负异常,而稀土元素配分曲线显示轻、重稀土元素分异明显,呈右倾富集轻稀土元素型,具有弱的负 Eu 异常,同样与 I 型花岗岩相似.文光岭岩体具有较低的 10 000 * Ga/Al 值(2.14~2.36),明显低于 A 型花岗岩的下限值(2.6, Whalen *et al.*, 1987),而且元素组合 Zr +

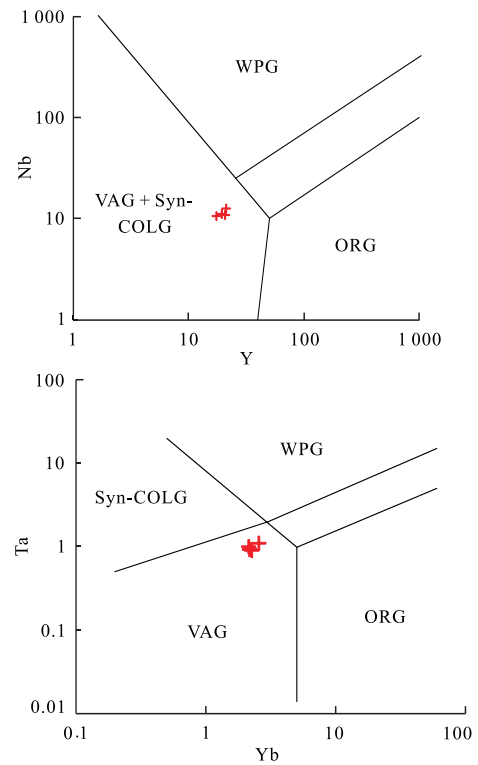


图 6 广东省文光岭花岗闪长岩构造环境判别图

Fig.6 Tectonic setting discrimination diagram of Wen-guangling granodiorites in Guangdong Province Syn-COLG.同碰撞花岗岩; WPG.板内花岗岩; VAG.岛弧花岗岩; ORG.洋中脊花岗岩.底图据 Pearce *et al.*(1984)

Nb+Ce+Y 的平均值为 260×10^{-6} ,明显低于 A 型花岗岩的下限值(350×10^{-6} , Whalen *et al.*, 1987).因此,文光岭花岗闪长岩与 S 型和 A 型花岗岩有明显的区别,而应归属为钾玄质和高钾钙碱性的 I 型花岗岩.

4.3 构造背景

文光岭花岗闪长岩体富集大离子亲石元素、LREE 和不相容元素,相对亏损高场强元素,显示出与俯冲作用相关的岩浆地球化学特征(Gill, 1981; Thirwall *et al.*, 1994; 赵少卿等, 2015; Zheng *et al.*, 2015).另外,文光岭花岗闪长岩体的 Nb/U 比值(1.0~1.4)比 MORB 和 OIB(Nb/U \approx 47, Hofmann *et al.*, 1986)低很多,也低于陆壳上地壳(Nb/U \approx 9, Taylor and Mclennan, 1985)以及全球平均俯冲沉积物(Nb/U \approx 5, Plank and Langmuir, 1998),接近俯冲带释放流体的 Nb/U 比值(Nb/U \approx 0.22, Ayers, 1998),同样表明区内俯冲作用过程中释放的流体对地幔进行了交代作用(郑伟, 2016).利用多组微量元素构造环境判别图解判断(Pearce *et al.*, 1984):文光岭花岗闪长岩体所有样品在 Y-Nb 图解中均投影在火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩区内;在

Yb-Ta 图解中,样品均投影在火山弧花岗岩区(图 6)。文光岭矿区位于吴川—四会深大断裂中段和钦杭成矿带的南段,也就是具有“伤疤”的薄弱地带,壳幔相互作用强烈,成岩成矿作用强度大(毛景文等, 2011;郑伟,2016)。基于实验数据和区内地质事实,本文认为早侏罗世伊泽奈奇板块向大陆斜向俯冲,导致整体从特提斯构造域向太平洋构造域的转换(Maruyama and Send, 1986;万天丰和朱鸿,2002;毛景文等,2008;郑伟等,2013c;Zheng *et al.*, 2015;郑伟,2016)。随着伊泽奈奇板块由南东方向向北西方向斜俯冲,中国东部大陆边缘成为活动大陆边缘,遂沿着钦杭古板块缝合带发生俯冲,随着富集交代地幔的部分熔融以及上侵,从而形成埃达克质岩浆或高钾钙碱质岩浆,岩浆侵位进而形成斑岩—矽卡岩铜多金属矿床,其成岩成矿时间大约在 175~155 Ma 之间(毛景文等,2011)。阳春盆地中与中侏罗世侵入岩有关的铜多金属矿床成矿系列便是在此构造背景下形成,如陂头面、旗鼓岭、文广岭、芒饿岭和茶地等多金属矿床(郑伟等,2018a,2018b)。

5 结论

(1)文光岭花岗闪长岩为准铝质 I 型花岗岩系列,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,且具有弱的负锶异常。

(2)与文光岭铜多金属矿密切相关的花岗闪长岩体形成于 165.7 ± 1.9 Ma,综合区域构造演化和成岩成矿年代学数据,推断文光岭花岗闪长岩体的形成应与太平洋板块的俯冲作用有关。

致谢:审稿专家给论文提出了许多建设性的意见,在此一并致谢!

附表 1 见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- An, G. Y., 2012. Geological Features and Space-Time Distribution of Mineral Deposits in the Yunkai Region, Guangxi. *Acta Geologica Sichuan*, 32(3): 281–285 (in Chinese with English abstract).
- Ayers, J., 1998. Trace Element Modeling of Aqueous Fluid-Peridotite Interaction in the Mantle Wedge of Subduction Zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(4): 390–404. <https://doi.org/10.1007/s004100050431>
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Cai, M. H., Zhan, M. G., Peng, S. B., et al., 2002. Study of Mesozoic Metallogenic Geological Setting and Dynamic Mechanism in Yunkai Area. *Mineral Deposits*, 21(3): 264–269 (in Chinese with English abstract).
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00086-3)
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1974. Two Contrasting Granite Types. *Pacific Geology*, 8: 173–174.
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1992. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1–2): 1–26. <https://doi.org/10.1017/S0263593300007720>
- Chen, M. H., Huang, Z. Z., Li, B., et al., 2012. Geochemistry of Granitoid Rocks of Shedong W-Mo Deposit District in Cangwu County, Guangxi and Its Relation to Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 199–212 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Li, Z. Y., Li, Q., et al., 2015. A Preliminary Study of Multi-stage Granitoids and Related Metallogenic Series in Dayaoshan Area of Guangxi, China. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 41–53 (in Chinese with English abstract).
- Chu, K. L., 2013. The Diagenesis and Metallogenesis Studies on Yuanzhuding Porphyry Cu-Mo Deposit in Guangdong (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Gill, J. B., 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer-Verlag, New York, 390.
- Hofmann, A. W., Jochum, K. P., Seufert, M., et al., 1986. Nb and Pb in Oceanic Basalts: New Constraints on Mantle Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1–2): 33–45. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90038-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90038-5)
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2002. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x>
- Hua, R. M., Chen, P. R., Zhang, W. L., et al., 2005. Three Major Metallogenic Events in Mesozoic in South China. *Mineral Deposits*, 24(2): 99–107 (in Chinese with English abstract).

- Kelemen, P. B., Hanghø, J. K., Greene, A. R., 2003. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 593–659.
- Li, W., Bi, S. J., Yang, Z., et al., 2015. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Characterization of Sheshan Granodiorite in Southern Edge of Dayaoshan, Guidong: Constraints on Caledonian Diagenesis and Mineralization. *Earth Science*, 40(1): 17–33 (in Chinese with English abstract).
- Liang, Y. H., Zhang, Q. F., Yang, S. Y., et al., 1998. Metallogenic Regularities and Prediction of Yunkai Uplifted Region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liégeois, J. P., Navez, J., Hertogen, J., et al., 1998. Contrasting Origin of Post-Collisional High-K Calc-Alkaline and Shoshonitic versus Alkaline and Peralkaline Granitoids. The Use of Sliding Normalization. *Lithos*, 45(1–4): 1–28. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00023-1](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00023-1)
- Liu, S., Wang, C. L., Huang, W. T., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Dynamic Background of the Dabaoshan Porphyry Associated with Mo-W Mineralization in Northern Guangdong Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(3): 440–449 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Special Publication / Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Mao, J. W., Chen, M. H., Yuan, S. D., et al., 2011. Geological Characteristics of the Qinhang (or Shihang) Metallogenic Belt in South China and Spatial-Temporal Distribution Regularity of Mineral Deposits. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636–658 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2007. Large-Scale Tungsten-Tin Mineralization in the Nanling Region, South China: Metallogenic Ages and Corresponding Geodynamic Processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329–2338 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510–526 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Li X. F., et al., 2004. Mesozoic Large Scale Mineralization and Multiple Lithospheric Extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45–55 (in Chinese with English abstract).
- Mao, W., Li, X. F., Yang, F. C., 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of Granites at Dabaoshan Polymetallic Deposit and Its Geological Significance, Guangdong, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4104–4120 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama, S., Send, T., 1986. Orogeny and Relative Plate Motions: Example of the Japanese Islands. *Tectonophysics*, 127(3–4): 305–329. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90067-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(86)90067-3)
- Meng, Q. F., Yu, X. F., Zheng, W., 2016. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Quartz Monzonite from the Jidetun Molybdenum Deposit in Jilin Province. *Acta Geologica Sinica*, 90(5): 917–932 (in Chinese with English abstract).
- Miller, C. F., 1985. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources?. *The Journal of Geology*, 93(6): 673–689. <https://doi.org/10.1086/628995>
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81.
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1998. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, 145(3–4): 325–394. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00150-2)
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22: 247–263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Shen, R. W., Hai, T., Liu, C. M., 2010. Analysis of Potential Polymetallic Deposits in the Yangchun Basin in Guangdong Province. *Geology and Exploration*, 46(Suppl.): 1249–1255 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implication for Mantle Composition and Process. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basin. Geological Society Special Publication*, 42: 313–345.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.
- Thirlwall, M. F., Smith, T. E., Graham, A. M., et al., 1994. High Field Strength Element Anomalies in Arc Lavas: Source or Process?. *Journal of Petrology*, 35(3): 819–838. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.3.819>
- Wan, T. F., Zhu, H., 2002. Tectonics and Environment Change of Meso-Cenozoic in China Continent and Its

- Adjacent Areas. *Geoscience*, 16(2):107–120(in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Hu, M. A., Qu, W. J., et al., 2012. Zircon LA-ICP-MS U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating of the Dabaoshan Polymetallic Deposit in Northern Guangdong Province and Its Geological Implications. *Geology in China*, 39(1):29–42(in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4):407–419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185–220(in Chinese with English abstract).
- Yang, G., Xiao, L., Wang, G. C., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Zircon Lu-Hf Study of Granites in Western Section of Xiemisitai Area, Western Junggar. *Earth Science*, 40(3):548–562(in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. Q., Fu, L. B., Wei, J. H., et al., 2015. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Late Triassic Quartz Diorites in Zhiduo Area, Qinghai Province. *Earth Science*, 40(1):61–76(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., 2016. The Yanshanian Minerogenetic Series and Mineralization of Polymetallic Deposit in the Yangchun Basin of Yunkai Area, South China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., Chen, M. H., Zhao, H. J., et al., 2012. Characteristics of Sulfides and S-Pb Isotope Composition in the Tiantang Cu-Pb-Zn Polymetallic Deposit of Guangdong Province and Their Geological Implications. *Geology in China*, 39(6):1830–1846(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., Mao, J. W., Pirajno, F., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Shilu Cu-Mo Deposit in the Yunkai Area, Guangdong Province, South China and Its Implication. *Ore Geology Reviews*, 67:382–398.
- Zheng, W., Mao, J. W., Zhao, C. S., et al., 2018. Early Cretaceous Magmatism and Associated Polymetallic Mineralization in South China: The Tiantang Example. *International Geology Review*, 60(11–14):1560–1580.
- Zheng, W., Mao, J. W., Zhao, H. J., et al., 2017a. Two Late Cretaceous A-Type Granites Related to the Yingwuling W-Sn Polymetallic Mineralization in Guangdong Province, South China: Implications for Petrogenesis, Geodynamic Setting, and Mineralization. *Lithos*, 274–275:106–122.
- Zheng, W., Mao, J. W., Zhao, H. J., et al., 2017b. Geochemistry, Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes Systematics and Geochronological Constrains on Petrogenesis of the Xishan A-Type Granite and Associated W-Sn Mineralization in Guangdong Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 88:739–752.
- Zheng, W., Zhao, H. J., Chen, M. H., et al., 2013a. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenites from the Yingwuling Polymetallic Deposit in Guangdong Province and Its Geological Significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 33(3):38–46(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., Chen, M. H., Zhao, H. J., et al., 2013b. Zircon U-Pb Geochronological and Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of Yingwuling Tungsten Polymetallic Deposit in Guangdong Province and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12):4121–4135(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., Chen, M. H., Xu, L. G., et al., 2013c. Rb-Sr Isochron Age of Tiantang Cu-Pb-Zn Polymetallic Deposit in Guangdong Province and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 32(2):259–272(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., Ouyang, Z. X., Chen, Y. L., et al., 2018a. Re-Os Age of Molybdenite and Ore-Forming Material Source of the Qiguling Cu-W-Mo Polymetallic Deposit in the Southern Section of the Qinghang Metallogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 92(1):94–106(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., Mao, J. W., Ouyang, Z. X., et al., 2018b. Geochronology of Potomian Cu Polymetallic Deposit in Yangchun Basin, Zircon Trace Element and Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9):2671–2686(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., Mao, J. W., Zhao, H. J., et al., 2015. A Preliminary Study of Minerogenetic Series and Geodynamic Background of Polymetallic Deposits in Yangchun Basin of Western Guangdong Province. *Mineral Deposits*, 34(3):465–487(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W., Ouyang, H. G., Zhao, H. J., et al., 2017. Re-Os Dating for the Molybdenite from the Xiping Mo-Cu Polymetallic Deposit in Guangdong Province and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3):843–858(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安国英, 2012. 广西云开地区矿产特征及时空分布规律. *四川地质学报*, 32(3):281–285.

- 蔡明海,战明国,彭松柏,等,2002.云开地区中生代成矿地质背景及成矿动力学机制研究.矿床地质,21(3):264-269.
- 陈懋弘,黄智忠,李斌,等,2012.广西苍梧社洞钨钼矿床花岗岩类岩石的地球化学特征及其与成矿关系.岩石学报,28(1):199-212.
- 陈懋弘,李忠阳,李青,等,2015.初论广西大瑶山地区多期次花岗岩质岩浆活动与成矿系列.地学前缘,22(2):41-53.
- 楚克磊,2013.广东圆珠顶斑岩型铜钼矿床成岩成矿作用研究(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 华仁民,陈培荣,张文兰,等,2005.论华南地区中生代3次大规模成矿作用.矿床地质,24(2):99-107.
- 李巍,毕诗健,杨振,等,2015.桂东大瑶山南缘社山花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征:对区内加里东期成岩成矿作用的制约.地球科学,40(1):17-33.
- 梁约翰,张启富,杨世义,等,1998.云开隆起区成矿规律与成矿预测.北京:地质出版社.
- 刘莎,王春龙,黄文婷,等,2012.粤北大宝山斑岩钼钨矿床赋矿岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄与矿床形成动力学背景分析.大地构造与成矿学,36(3):440-449.
- 毛景文,陈懋弘,袁顺达,等,2011.华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律.地质学报,85(5):636-658.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2007.南岭地区大规模锡钨多金属成矿作用:成矿时限及地球动力学背景.岩石学报,23(10):2329-2338.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2008.华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境.高校地质学报,14(4):510-526.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等,2004.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展.地学前缘,11(1):45-55.
- 毛伟,李晓峰,杨富初,2013.广东大宝山多金属矿床花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义.岩石学报,29(12):4104-4120.
- 孟庆丰,于晓飞,郑伟,2016.吉林季德屯钨矿区石英二长岩 SIMS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其成因.地质学报,90(5):917-932.
- 沈睿文,海涛,刘昌明,2010.广东阳春盆地多金属找矿潜力浅析.地质与勘探(增刊),46:1249-1255.
- 万天丰,朱鸿,2002.中国大陆及邻区中生代-新生代大地构造与环境变迁.现代地质,16(2):107-120.
- 王磊,胡明安,屈文俊,等,2012.粤北大宝山多金属矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义.中国地质,39(1):29-42.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185-220.
- 杨钢,肖龙,王国灿,等,2015.西准噶尔谢米斯台西段花岗岩年代学、地球化学、锆石 Lu-Hf 同位素特征及大地构造意义.地球科学,40(3):548-562.
- 赵少卿,付乐兵,魏俊浩,等,2015.青海治多地区晚三叠世石英闪长岩地球化学特征及成岩动力学背景.地球科学,40(1):61-76.
- 郑伟,2016.云开地区阳春盆地燕山期多金属矿床成矿系列(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 郑伟,陈懋弘,徐林刚,等,2013c.广东天堂铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义.矿床地质,32(2):259-272.
- 郑伟,陈懋弘,赵海杰,等,2012.广东天堂铜铅锌多金属矿床矿物学、硫化物 S-Pb 同位素特征及地质意义.中国地质,39(6):1830-1846.
- 郑伟,陈懋弘,赵海杰,等,2013b.广东鹦鹉岭钨多金属矿床中黑云母花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征及其地质意义.岩石学报,29(12):4121-4135.
- 郑伟,毛景文,欧阳志侠,等,2018b.阳春盆地陂头面铜多金属矿床成岩成矿年代学、锆石微量元素及地质意义.岩石学报,34(9):2671-2686.
- 郑伟,毛景文,赵海杰,等,2015.粤西阳春盆地多金属矿床成矿系列及动力学背景.矿床地质,34(3):465-487.
- 郑伟,欧阳荷根,赵海杰,等,2017.广东锡坪钼铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义.岩石学报,33(3):843-858.
- 郑伟,欧阳志侠,陈友良,等,2018a.钦杭成矿带南段旗鼓岭铜钨钼多金属矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及成矿物质来源.地质学报,92(1):94-106.
- 郑伟,赵海杰,陈懋弘,等,2013a.广东鹦鹉岭多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素定年及其意义.矿物岩石,33(3):38-46.

附表 1 广东省文光岭花岗闪长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Appendix table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the Wenguangling granodiorite in Guangdong Province

Spot No.	U(10^{-6})	Th(10^{-6})	Pb(10^{-6})	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$		$\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$		$\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$	
						1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ
WGL02-1	1 044	715	35	0.39	0.053 945	0.001 903	0.199 653	0.008 044	0.026 652	0.000 420	368.6	84.3	184.8	6.8	169.6	2.6
WGL02-2	1 178	883	39	0.50	0.048 495	0.001 348	0.174 099	0.004 884	0.026 125	0.000 363	124.2	64.8	163.0	4.2	166.3	2.3
WGL02-3	1 012	673	33	0.41	0.049 759	0.001 447	0.177 904	0.006 125	0.025 830	0.000 368	183.4	63.9	166.3	5.3	164.4	2.3
WGL02-4	721	571	24	0.39	0.048 981	0.001 303	0.178 767	0.005 209	0.026 323	0.000 302	146.4	63.0	167.0	4.5	167.5	1.9
WGL02-5	855	518	28	0.50	0.049 071	0.001 382	0.180 691	0.005 074	0.026 729	0.000 375	150.1	66.7	168.7	4.4	170.0	2.4
WGL02-6	995	665	32	0.43	0.048 584	0.001 451	0.175933	0.005 620	0.026 093	0.000 362	127.9	70.4	164.6	4.9	166.1	2.3
WGL02-7	986	567	32	0.44	0.047 356	0.001 484	0.172 002	0.005 025	0.026 269	0.000 338	77.9	61.1	161.2	4.4	167.2	2.1
WGL02-8	908	515	28	0.47	0.046 851	0.001 285	0.169 699	0.004 944	0.026 081	0.000 357	42.7	63.0	159.2	4.3	166.0	2.2
WGL02-9	1 023	644	33	0.37	0.048 040	0.001 356	0.172 672	0.005 196	0.025 872	0.000 289	101.9	66.7	161.7	4.5	164.7	1.8
WGL02-10	975	678	31	0.41	0.052 560	0.001 608	0.192 672	0.007 055	0.026 305	0.000 396	309.3	75.0	178.9	6.0	167.4	2.5
WGL02-11	1 178	817	38	0.43	0.047 810	0.001 231	0.169 470	0.004 691	0.025 645	0.000 308	100.1	61.1	159.0	4.1	163.2	1.9

WGL02-12	1 113	772	36	0.52	0.048 689	0.001 142	0.175 426	0.004 303	0.026 135	0.000 331	131.6	55.6	164.1	3.7	166.3	2.1
WGL02-13	921	516	32	0.67	0.052 286	0.001 427	0.199 976	0.004 895	0.028 053	0.000 463	298.2	65.7	185.1	4.1	178.4	2.9
WGL02-14	1 115	1 016	41	0.51	0.052 492	0.001 233	0.195 798	0.004 974	0.027 028	0.000 348	305.6	56.5	181.6	4.2	171.9	2.2
WGL02-15	1 099	599	34	0.41	0.049 327	0.001 247	0.173 002	0.004 483	0.025 485	0.000 270	164.9	59.3	162.0	3.9	162.2	1.7
WGL02-16	943	591	30	0.43	0.049 792	0.001 446	0.173 205	0.004 998	0.025 361	0.000 316	187.1	66.7	162.2	4.3	161.5	2.0
WGL02-17	1 503	1 236	50	0.41	0.053 080	0.001 342	0.185 946	0.004 756	0.025 510	0.000 271	331.5	57.4	173.2	4.1	162.4	1.7
WGL02-18	996	646	31	0.40	0.052 572	0.001 552	0.184 611	0.005 967	0.025 401	0.000 332	309.3	66.7	172.0	5.1	161.7	2.1
