

广东玉水铜多金属矿床岩浆活动对永梅坳陷带构造演化的约束：来自花岗斑岩和辉绿岩锆石年龄的证据

李莎莎^{1,2}, 陈华勇^{1,2*}, 彭永新⁴, 汪礼明³, 罗志荣⁴

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广东省有色金属地质局, 广东 广州 510030; 4. 梅州市金雁实业集团公司, 广东 梅州 514021)

摘要: 众所周知, 矿床是地球动力学研究的有效探针。广东省梅州玉水铜铅锌多金属矿床是以产出特富铜铅锌矿石、易采和经济价值高等为特点的中型矿床, 前人对该矿床的研究主要集中于矿床成因上, 但对矿区分布的花岗斑岩和辉绿岩岩脉及其所指示的构造意义缺乏关注。本文在前人研究的基础上, 运用激光剥蚀-电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)对区内脉状花岗斑岩和辉绿岩进行锆石 U-Pb 定年, 获得花岗斑岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 协和年龄为 (128.4 ± 1.0) Ma (MSWD = 2.6, $n = 26$); 辉绿岩锆石年龄范围分别为 1776~1114 Ma、533~437 Ma、282~255 Ma、226~209 Ma、186~154 Ma、141~125 Ma 和 87~56 Ma。结合锆石成因、野外辉绿岩切穿花岗斑岩和黄铜矿脉的关系, 认为辉绿岩的结晶年龄为 (59.3 ± 2.5) Ma ($n = 13$, MSWD = 3.1), 形成于晚古新世, 其动力学背景为陆缘拉张环境。辉绿岩中继承锆石年龄表明玉水矿区深部不仅存在新元古代的基底物质, 还经历了中晚侏罗世、白垩世的中酸性岩浆活动和早古近世的基性岩浆活动, 这些岩浆活动与华南地区晚中生代以来发育的多期地壳拉张活动相耦合。本研究也为中国东南部存在 50~60 Ma 地壳拉张事件提供了新的年龄证据。

关键词: 辉绿岩; 花岗斑岩; 锆石; LA-ICP-MS U-Pb 定年; 玉水铜矿

中图分类号: P595; P597.3; P586; P581 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2019)04-0313-12
DOI: 10.19700/j.0379-1726.2018.06.011

Tectonic evolution of the Yongmei depression constrained by zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of granite porphyry and diabase from the Yushui Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

LI Sha-sha^{1,2}, CHEN Hua-yong^{1,2*}, PENG Yong-xin⁴, WANG Li-ming³ and LUO Zhi-rong⁴

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Geology Bureau for Nonferrous Metals of Guangdong Province, Guangzhou 510030, China;
4. Jinyan Copper Industry Group Co., Ltd of Meizhou, Meizhou 514021, China

Abstract: It is understood that ore systems can provide accurate indicators to geodynamic settings and evolution. The Yushui Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in the Meizhou District of Guangdong Province, China, is a middle-scale deposit which that is well-known by for its high grade copper, economic value, and easy ease of to be exploitationed. Many studies have been focused on its ore the genesis of its ore, but little attention was has been paid to the magmatic rocks and its geodynamic settings in of the mine. In this study, zircon LA-ICP-MS U-Pb dating has been was conducted on the granite porphyry and diabase dykes in order to get obtain the ages of magmatic activity of in the studied area. A weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of (128.4 ± 1.0) Ma (MSWD = 2.6, $n = 26$) was attained for granite porphyry. Zircon ages for diabase can be divided into seven groups: 1776~1114 Ma, 533~437 Ma, 282~255 Ma, 226~209 Ma, 186~154 Ma, 141~125 Ma and 87~56 Ma. Combined with the origin of

收稿日期(Received): 2018-09-30; 改回日期(Revised): 2018-11-30; 接受日期(Accepted): 2018-12-03

基金项目: 国家杰出青年科学基金(4172500034); 广东省科技计划项目(2017B030314175)

作者简介: 李莎莎(1984-), 女, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: lisa.lee00@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Hua-yong, E-mail: huayongchen@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85292708

zircons and intercalated relationship between ore veins, granite porphyry, and diabase dykes, age of (59.3±2.5) Ma (MSWD = 3.1, $n = 13$) is considered to be the crystallizing age of the diabase. It This demonstrates that the a Neoproterozoic basement, and Middle-Late Jurassic, and Cretaceous felsic-intermediate magmatism, and Early Paleogene mafic magmatism may all exist in the study area. Our results also prove demonstrate that a coupling relationship between crustal extension and mafic magmatism existed at ca. 60 Ma in SE China.

Key words: diabase; granite porphyry; zircon; LA-ICP-MS U-Pb age; Yushui Cu deposit

0 引言

矿床是一种独特而复杂的地质体,往往是多种地质过程综合作用的结果,更全面或完整地记录了地壳演化的过程,是进行构造岩浆演化过程研究的良好探针^[1]。广东省梅州市玉水铜铅锌多金属矿床位于永梅拗陷带内,虽为中型规模,但以其特富的块状矿石、铜铅锌矿石的平均品位均超过最低工业品位的10倍以上,及易采、具有较高的经济价值等特点而广为人知^[2-5]。前人对玉水矿床进行了一系列的研究并获得一些重要认识:何耀基^[2]通过对矿床地质特征、矿体特征和硫化物S、Pb同位素分析,对矿床成因做出了初步总结;蔡锦辉等^[6]和刘家齐^[7]等研究了玉水矿床的成矿流体及来源;汪礼明等^[4]和陈文强^[5]等对玉水矿床的研究工作进行了归纳;Huang *et al.*^[8]测试分析了黄铜矿成矿年龄,结合矿床地质特征,认为矿床成因为海底喷流作用和后期热液改造形成;蒋斌斌等^[9]则认为矿床成因为层控低温热液型矿床,属于非典型的密西西比河谷型(MVT)矿床。

然而,玉水矿床的研究多集中于矿床成因方面,对矿区内岩浆活动及其所代表的构造演化过程研究较少。陈炳辉等^[10]虽对矿区矿体与辉绿岩的关系进行了研究,但并未对花岗斑岩和辉绿岩进行精确定年。本文通过对矿区的花岗斑岩和辉绿岩进行坑道采样和精确的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及锆石微量元素组成测定,分析花岗斑岩和辉绿岩的形成时代。并与东南沿海地区的基性岩脉对比,分析其形成的地质过程和构造背景,以理解该侵入岩对永梅拗陷在晚白垩世到晚古新世构造演化的约束。

1 矿区地质

玉水铜铅锌多金属矿床所处的永安-梅县拗陷区北起福建将乐、永安,南经梅县到广东惠州,呈北

北东向狭长带状,东西两侧大致以政和-大埔断裂带、邵武-河源大断裂为界,全长约550 km,宽100~170 km(图1)。永安-梅县晚古生代海西拗陷中段(即玉水铜矿所处构造位置)海相地层发育,厚度较大,岩相复杂^[1,6,10]。

矿区内出露的主要地层,自下而上有中泥盆-下石炭统浅海-滨海相碎屑岩建造、中上石炭统壶天群浅海-滨海相碳酸盐岩、上侏罗统高基坪群陆相火山岩、下白垩统管草湖群内陆湖相火山-碎屑沉积岩^[2]。其中,主矿体赋存于下石炭统与中上石炭统之间的不整合界面及中上石炭统碳酸盐岩中,呈层状、似层状、透镜状矿体,厚度0~19 m,占整个矿床Cu-Pb-Zn金属总量的80%以上^[2,4,7]。矿石矿物以黄铜矿和斑铜矿为主,其次是辉铜矿、黄铁矿、闪锌矿和方铅矿;脉石矿物主要为石英、绢云母、绿泥石和方解石等。矿石结构主要为共结结构、固溶体分离结构、交代结构、充填交代结构、交代残余结构和压碎结构等,矿石构造则主要为块状构造、浸染状构造和脉状构造等。

区内构造简单,主要发育近EW向控矿断裂(F₂₃,图2)和NNE向破矿断裂(F₁₂、F₆),铜铅锌多金属矿体局部被破坏,沿断面层被后期花岗斑岩、辉绿岩充填^[2]。

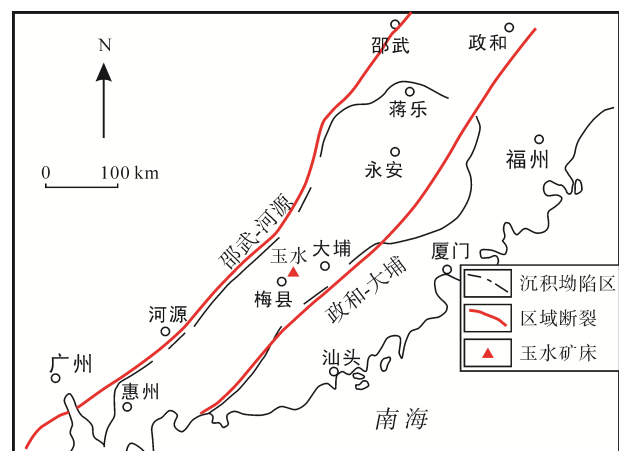


图1 玉水矿区区域地质简图(据文献[2]修改)

Fig.1 Geologic view of the Yushui deposit district (modified from reference [2])

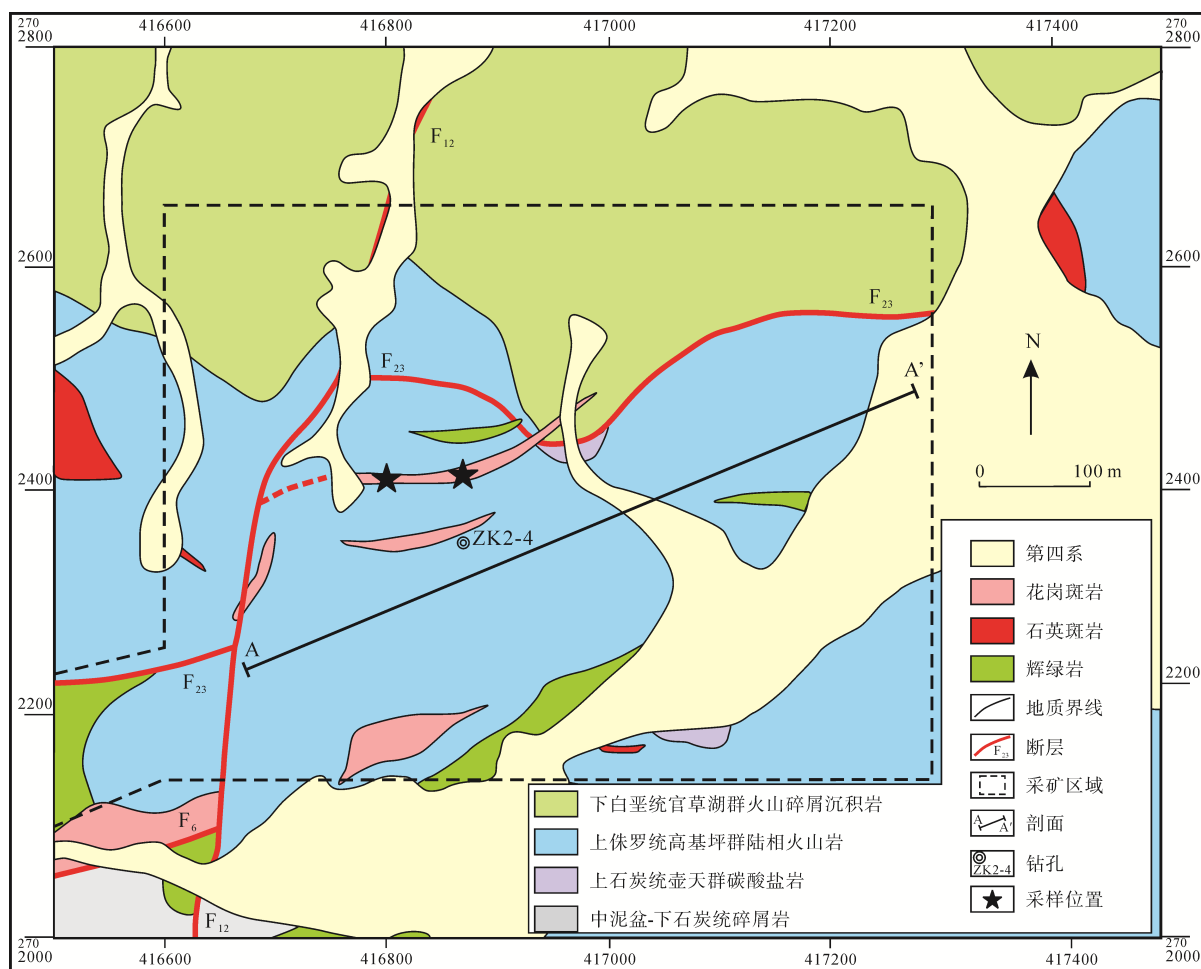


图 2 玉水铜铅锌多金属矿床地质图(据文献[8]修改)

Fig.2 Geological map of the Yushui deposit (modified from reference [8])

2 岩石学特征

玉水铜铅锌多金属矿区岩浆岩在地表较少出露,在井下主要观察到花岗斑岩和辉绿岩。两期岩体均穿切矿体,界线平直,说明岩体为成矿后侵入。辉绿岩和花岗斑岩的形态复杂,沿断裂构造面呈岩瘤、岩脉、岩枝状产出,在井下可见花岗斑岩和辉绿岩体切穿主矿体(图 3),陈炳辉等^[10]在钻孔岩芯中观察到花岗斑岩明显被辉绿岩穿插,表明辉绿岩可能是矿区内最后一期岩浆活动。

花岗斑岩: 呈肉红色,斑状结构,块状构造(图 4a)。斑晶主要为石英、钾长石及少量斜长石和黑云母,长石斑晶呈自形-半自形,粒径 2~5 mm,石英斑晶呈他形粒状,粒径为 1~4 mm,长石、石英斑晶常见溶蚀结构;基质成分主要为石英和长石,显微晶质结构、隐晶质结构(图 4b);副矿物有锆石、磷灰石等。岩石发生了轻微的绿泥石化和钾

长石化蚀变。

辉绿岩: 主要以岩脉形式切穿矿体,与地层呈侵入接触关系,脉宽 30~50 cm。岩石呈灰绿色-暗绿色,中细粒结构,块状构造(图 4c)。镜下可见辉绿结构,表现为他形角闪石颗粒充填于板状斜长石网架状排列的空隙间。主要矿物由斜长石、辉石和黑云母组成,另有少量磁铁矿。斜长石含量超过 60%,灰白色,呈长柱状和板柱状,粒径在 0.1~5 mm 或 1~2 mm,自形到半自形,构成三角形骨架(图 4d);辉石呈他形,但多已变质为黑云母,仍残存其原始结构,呈不规则粒状嵌于由斜长石形成的三角架间隙中,具有典型的辉绿结构。

3 锆石 U-Pb 定年与成分特征

本文选取矿区内的两期侵入岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年。花岗斑岩样品 YSQ-01 和 YSQ-02

采集于玉水铜铅锌多金属矿区采矿区井下-160 m 水平位置, 辉绿岩样品 YSQ-02 和 YS18-007 采集于玉

水铜铅锌多金属矿区采矿区井下-70 m 水平位置, 具体采样位置见图 2。

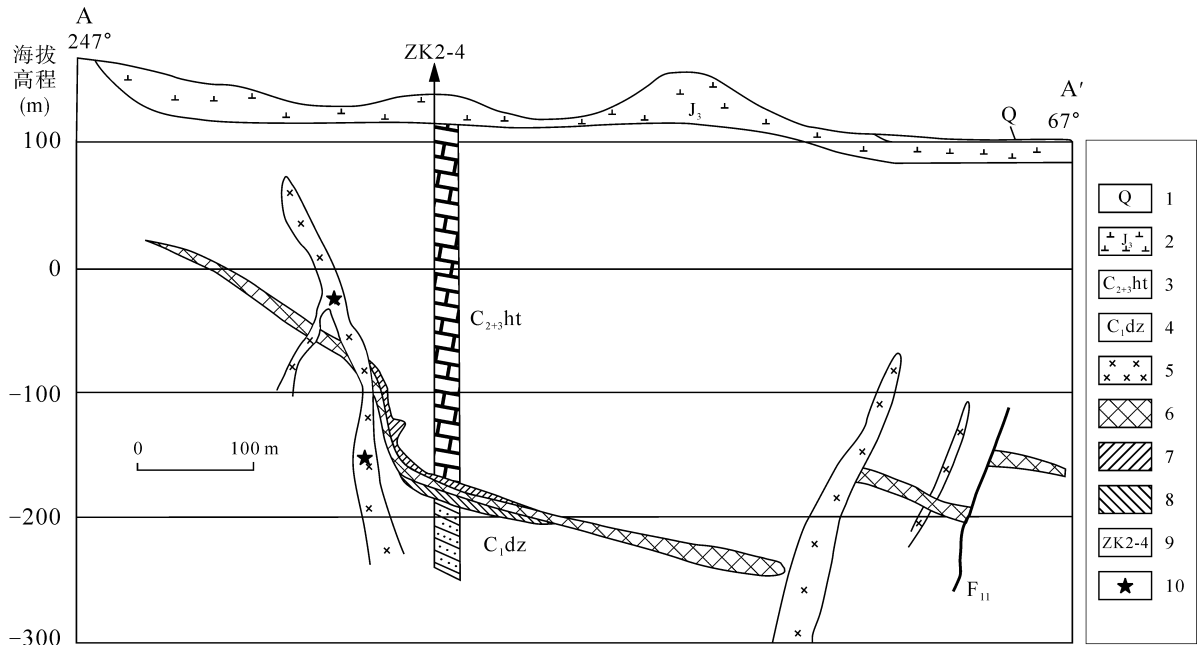


图 3 玉水矿床 A-A'地质剖面(据文献[2,5]修改)

Fig.3 Cross section of exploration line A-A' and drillhole column of ZK2-4 from the Yushui deposit (modified from references [2,5])
 1-第四系; 2-侏罗系陆相火山岩; 3-壶天群灰岩; 4-忠信组石英砂岩; 5-辉绿岩; 6-块状铜铅锌矿石; 7-灰岩中浸染状铜铅锌矿石; 8-砂岩中浸染状铜矿石; 9-钻孔及编号; 10-采样位置

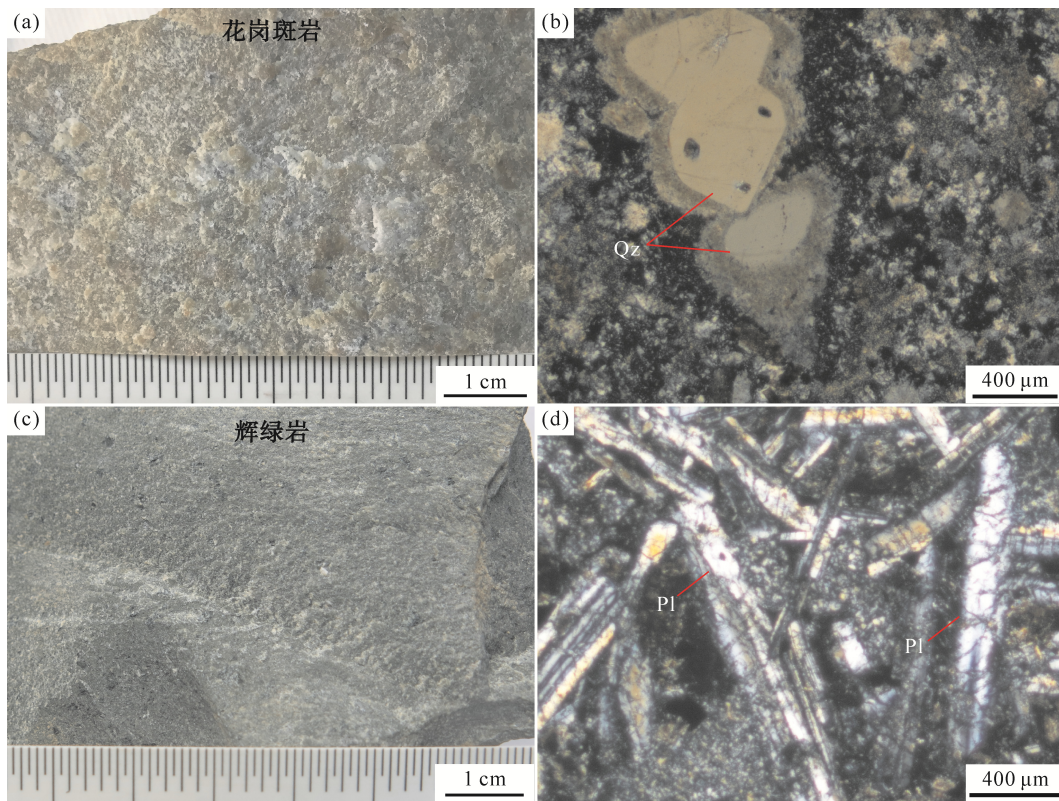


图 4 玉水矿床花岗斑岩(a 和 b)和辉绿岩(c 和 d)手标本及显微镜下照片

Fig.4 Photos of hand specimen (a and c) and micrograph (b and d) of granite porphyry and diabase at the Yushui deposit
 (b) 花岗斑岩的基质已被蚀变, 石英斑晶仍清晰可见, 在石英周围出现明显的溶蚀边; (d) 可清晰见到辉绿岩中呈长条状的斜长石和典型的辉绿结构。Qz-石英; Pl-斜长石

3.1 测试方法

锆石单矿物挑选、锆石制靶和阴极发光(CL)照相由广州市拓岩检测技术有限公司完成,用于挑选锆石的样品用清水清洗,碎至粒径为 0.150 mm (100 目),以确保锆石没有连生体,然后按重力及电磁法浮选出可能的锆石颗粒,最后在双目镜下挑选剔除杂质,使锆石纯度达到 99%以上。尽量挑选震荡环带结构清晰、晶形较好的锆石进行定年分析,以确保这些锆石为岩浆成因,测试点的位置选择锆石核部与边部之间的环带过渡部位。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及锆石微量元素组成分析在中山大学海洋科学学院 LA-ICP-MS 测试中心完成。所用仪器为 Teledyne Cetac Technologies 制造的 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统配套安捷伦科技制造(Agilent Technologies)的 7700x 四极杆型电感耦合等离子体质谱仪。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面,激光剥蚀所用束斑直径为 32 μm , 频率为 5 Hz, 能力密度

约为 5 J/cm², 共剥蚀 40 s, 剥蚀气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标,校正仪器质量歧视与元素分馏;以 NIST SRM610 为外标,以 Si 为内标标定锆石中的 Pb 元素含量,以 Zr 为内标标定锆石中其余微量元素含量^[11-12]。为了保证测试结果的可靠性,每分析 5 个测点后测试 1 次标样以检测仪器的稳定性和离子技术的精确性。数据处理采用中国地质大学刘勇胜研发的 LCPMSDataCal 10.1 程序进行数据处理,年龄计算使用 Isoplot (ver 3.0)完成。

3.2 锆石特征及分析结果

从花岗斑岩样品(YSQ-01 和 YSQ-02)中挑选的 26 颗锆石,形态为半透明的自形、半自形和少量碎裂晶,长 30~100 μm , 长宽比 1 : 1~2.5 : 1; 在 CL 图像(图 5a)中,大多数锆石虽然颜色较暗但具有代表岩浆锆石的震荡环带特征,锆石稀土元素球粒陨石标准化分布模式呈重稀土元素富集型,且具有明显的 Ce 正异常(图 6),表明测试的锆石均为岩浆锆石。

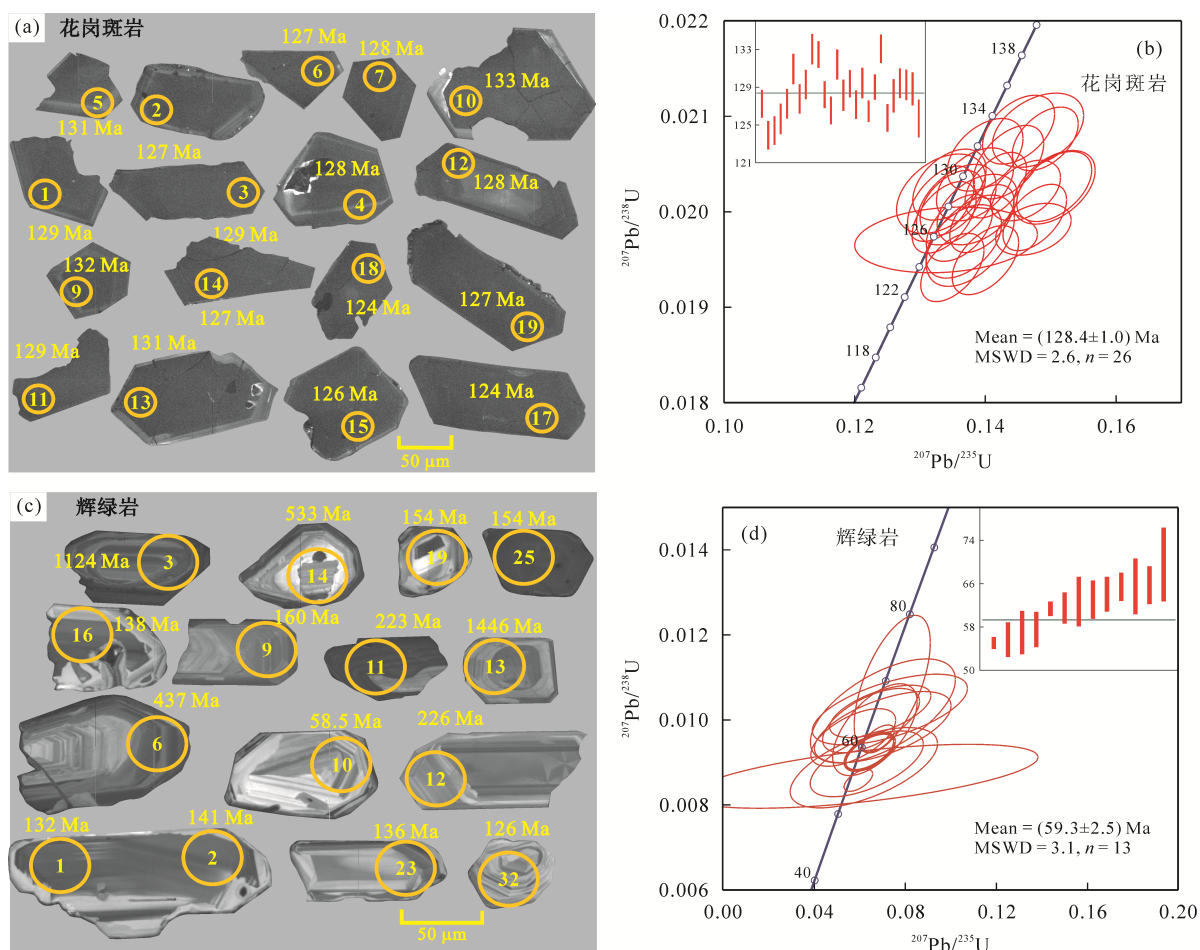


图 5 花岗斑岩和辉绿岩锆石阴极发光照片(a 和 c)及锆石 U-Pb 年龄谐和图(b 和 d)

Fig.5 Cathodoluminescence images (a and c) and U-Pb concordia diagram (b and d) for zircons from granite porphyry and diabase

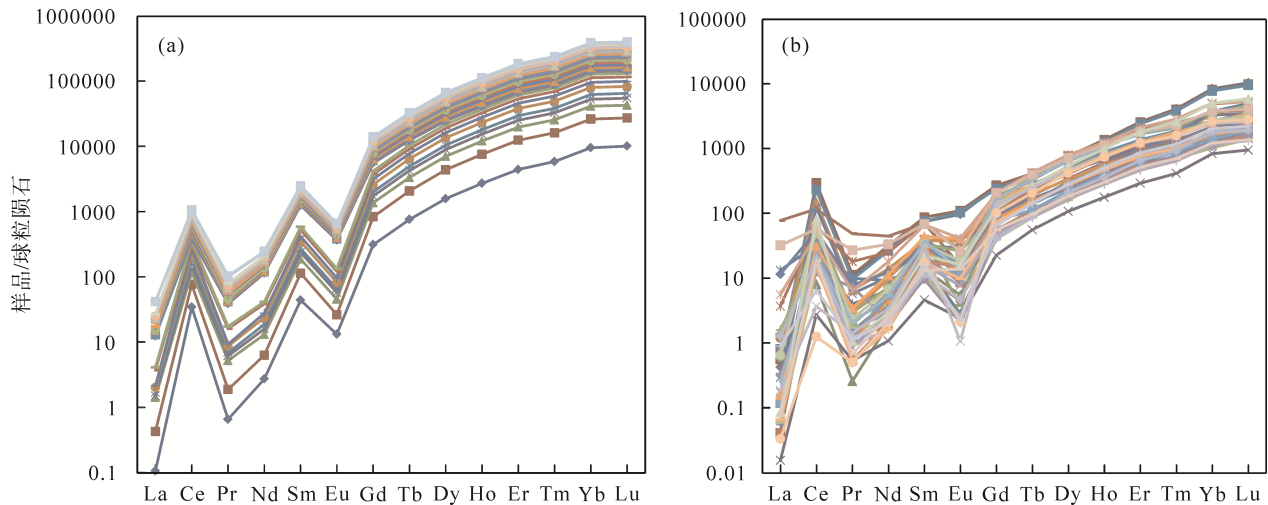


图6 花岗斑岩(a)和辉绿岩(b)锆石稀土元素球粒陨石标准化分布模式

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern of zircon for granite porphyry (a) and diabase (b)

本次共分析 26 个锆石点, U 含量为 30~99 $\mu\text{g/g}$, Th 含量为 19~73 $\mu\text{g/g}$, Th/U 比值为 0.43~0.80, U、Th 之间具有正相关关系。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄数据范围较集中(135~125 Ma), 加权平均年龄为(128.4 \pm 1.0) Ma (MSWD = 2.6, $n = 26$)。

从辉绿岩样品(YSQ-02、YS18-007)中挑选的 46 颗锆石, 形态为透明-半透明的自形、半自形和碎裂晶, 长 30~150 μm , 长宽比 1 : 1~5 : 1。在 CL 图像上, 大多数锆石具有清晰的震荡环带, U 含量为 0.90~30.78 $\mu\text{g/g}$, Th 含量为 0.28~18.48 $\mu\text{g/g}$, Th/U 比值为 0.02~2.46, U、Th 之间具有正相关关系, 表明所测定的锆石为岩浆成因。锆石稀土元素球粒陨石标

准化分布模式呈重稀土元素富集型, 具有明显的 Ce 正异常, 与典型岩浆锆石特征一致。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据范围宽泛, 本次测试的年龄数据分为: 古元古代-中元古代(1776~1114 Ma, $n = 5$)、寒武纪-志留纪(533~437 Ma, $n = 3$)、二叠纪(282~255 Ma, $n = 2$)、晚三叠世(226~209 Ma, $n = 3$)、侏罗纪(186~154 Ma, $n = 9$)、早白垩世(141~125 Ma, $n = 7$)和晚白垩-古新世(87~56 Ma, $n = 13$)。其中锆石年龄主要集中在最年轻的年龄范围(87~56 Ma), 加权平均年龄为(59.3 \pm 2.5) Ma (MSWD = 3.1, $n = 13$) (图 5), 代表岩体结晶年龄。

测定结果见表 1。

表 1 花岗斑岩和辉绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb isotope analysis results for zircons from granite porphyry and diabase

测点	元素含量 ($\mu\text{g/g}$)			Th/U	同位素比值				同位素年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
花岗斑岩												
YSQ-01a-19	1.99	40.50	77.97	0.52	0.1476	0.0032	0.0199	0.0002	140.0	2.80	127.0	1.50
YSQ-01a-18	1.89	40.80	78.37	0.52	0.1350	0.0032	0.0194	0.0002	129.0	2.90	124.0	1.50
YSQ-01a-17	2.02	43.14	81.42	0.53	0.1400	0.0034	0.0195	0.0002	133.0	3.00	124.0	1.50
YSQ-01a-15	1.45	28.70	61.07	0.47	0.1367	0.0038	0.0197	0.0003	130.0	3.40	126.0	1.60
YSQ-01a-14	2.44	60.24	92.44	0.65	0.1337	0.0032	0.0199	0.0002	127.0	2.90	127.0	1.60
YSQ-01a-13	2.74	73.18	94.87	0.77	0.1435	0.0036	0.0205	0.0003	136.0	3.20	131.0	1.60
YSQ-01a-12	0.91	27.95	30.47	0.92	0.1388	0.0041	0.0200	0.0002	132.0	3.60	128.0	1.50
YSQ-01a-11	2.37	65.55	82.33	0.80	0.1505	0.0038	0.0203	0.0002	142.0	3.30	129.0	1.50
YSQ-01a-10	0.99	18.71	40.90	0.46	0.1481	0.0046	0.0209	0.0003	140.0	4.10	133.0	1.60
YSQ-01a-09	2.18	49.19	83.13	0.59	0.1492	0.0033	0.0208	0.0002	141.0	2.90	132.0	1.40
YSQ-01a-07	2.32	56.37	90.55	0.62	0.1348	0.0032	0.0201	0.0002	128.0	2.80	128.0	1.40
YSQ-01a-06	2.56	64.43	98.91	0.65	0.1360	0.0033	0.0198	0.0002	129.0	3.00	127.0	1.50
YSQ-01a-05	1.02	17.23	43.90	0.39	0.1400	0.0038	0.0206	0.0003	133.0	3.40	131.0	1.60

(续表 1)

测点	元素含量 ($\mu\text{g/g}$)			Th/U	同位素比值				同位素年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
花岗岩												
YSQ-01a-04	1.47	32.35	59.30	0.55	0.1332	0.0034	0.0201	0.0003	127.0	3.00	128.0	1.60
YSQ-01a-03	2.21	52.14	81.51	0.64	0.1416	0.0031	0.0203	0.0002	134.0	2.80	129.0	1.40
YSQ-01a-02	2.15	47.63	84.13	0.57	0.1395	0.0033	0.0199	0.0002	133.0	2.90	127.0	1.50
YSQ-01a-01	1.15	24.71	45.69	0.54	0.1384	0.0039	0.0203	0.0003	132.0	3.50	129.0	1.60
YSQ-02-01	1.88	45.92	72.68	0.63	0.1473	0.0038	0.0198	0.0002	140.0	3.40	127.0	1.10
YSQ-02-03	1.18	29.30	44.23	0.66	0.1461	0.0035	0.0202	0.0002	138.0	3.10	129.0	1.30
YSQ-02-04	1.45	27.69	59.78	0.46	0.1451	0.0036	0.0209	0.0002	138.0	3.20	133.0	1.50
YSQ-02-09	1.35	26.87	53.85	0.50	0.1340	0.0092	0.0197	0.0002	128.0	8.30	126.0	1.40
YSQ-02-25	1.17	22.61	52.54	0.43	0.1356	0.0040	0.0201	0.0003	129.0	3.60	128.0	1.80
YSQ-02-26	1.59	40.33	60.51	0.67	0.1345	0.0037	0.0203	0.0002	128.0	3.30	129.0	1.60
YSQ-02-28	1.76	35.66	70.73	0.50	0.1506	0.0041	0.0203	0.0003	142.0	3.60	129.0	1.60
YSQ-02-30	1.91	38.62	80.07	0.48	0.1332	0.0045	0.0202	0.0003	127.0	4.00	129.0	1.70
YSQ-02-31	1.76	40.41	68.26	0.59	0.1377	0.0045	0.0197	0.0003	131.0	4.00	126.0	2.00
辉绿岩												
YSQ-02-01	0.11	1.71	3.88	0.44	0.1745	0.0222	0.0245	0.0005	163.0	19.19	156.0	2.93
YSQ-02-02	0.03	2.40	2.04	1.18	0.0666	0.0123	0.0098	0.0007	65.5	11.66	62.7	4.56
YSQ-02-03	0.02	1.76	1.23	1.43	0.0618	0.0214	0.0089	0.0006	60.9	20.42	57.0	3.98
YSQ-02-05	0.03	3.14	2.38	1.32	0.0649	0.0140	0.0100	0.0005	63.9	13.40	64.0	3.19
YSQ-02-06	0.12	1.81	4.29	0.42	0.1460	0.0090	0.0230	0.0004	138.0	7.97	147.0	2.78
YSQ-02-07	0.22	2.77	9.25	0.30	0.1773	0.0094	0.0237	0.0005	166.0	8.10	151.0	3.11
YSQ-02-08	0.04	3.95	2.21	1.79	0.0732	0.0225	0.0102	0.0005	71.7	21.28	65.7	3.50
YSQ-02-09	0.19	3.63	6.88	0.53	0.1716	0.0096	0.0241	0.0005	161.0	8.35	153.0	3.06
YSQ-02-10	0.03	1.97	1.86	1.06	0.0690	0.0147	0.0102	0.0004	67.7	13.93	65.4	2.60
YSQ-02-11	0.01	1.00	1.04	0.97	0.0631	0.0164	0.0090	0.0005	62.1	15.66	57.6	3.26
YSQ-02-12	0.02	1.61	1.39	1.16	0.0742	0.0110	0.0108	0.0011	72.7	10.42	69.5	6.81
YSQ-02-13	0.97	1.28	2.43	0.53	4.7512	0.1708	0.3146	0.0065	1776.0	30.18	1763.0	32.03
YSQ-02-14	1.02	1.32	2.67	0.50	4.4470	0.1409	0.2952	0.0049	1721.0	26.30	1668.0	24.26
YSQ-02-15	0.02	1.60	1.30	1.22	0.0701	0.0198	0.0098	0.0006	68.8	18.80	63.1	3.53
YSQ-02-16	0.03	2.93	2.35	1.25	0.0571	0.0123	0.0096	0.0004	56.4	11.81	61.5	2.86
YSQ-02-18	0.03	2.04	2.29	0.89	0.0617	0.0506	0.0087	0.0005	60.8	48.37	55.7	3.17
YSQ-02-20	0.37	6.22	10.56	0.59	0.2016	0.0134	0.0278	0.0005	186.0	11.36	177.0	3.06
YSQ-02-22	0.10	8.26	5.26	1.57	0.0683	0.0046	0.0096	0.0002	67.1	4.33	61.4	1.34
YSQ-02-23	0.01	0.75	0.90	0.83	0.0897	0.0202	0.0127	0.0019	87.0	18.80	81.0	11.88
YSQ-02-24	0.57	3.37	19.72	0.17	0.2280	0.0080	0.0304	0.0005	209.0	6.59	193.0	3.43
YSQ-02-28	0.06	0.94	1.95	0.48	0.1776	0.0140	0.0248	0.0005	166.0	12.05	158.0	3.28
YSQ-02-31					0.0701	0.0210	0.0102	0.0008	68.8	19.94	65.5	5.15
YSQ-02-32	0.17	1.37	3.20	0.43	0.3199	0.0288	0.0405	0.0011	282.0	22.19	256.0	6.71
YSQ-02-33	0.18	3.35	6.10	0.55	0.1782	0.0100	0.0244	0.0004	167.0	8.63	155.0	2.21
YSQ-02B-01	0.33	9.40	12.21	0.77	0.1315	0.0052	0.0194	0.0003	125.0	4.71	124.0	1.67
YSQ-02B-06	1.73	1.98	4.84	0.41	4.4634	0.1258	0.3050	0.0044	1724.0	23.41	1716.0	21.91
YSQ-02B-09	1.33	10.67	30.78	0.35	0.2996	0.0089	0.0403	0.0005	266.0	6.99	255.0	3.10
YSQ-02B-14	0.12	0.93	2.81	0.33	0.2851	0.0144	0.0395	0.0006	255.0	11.39	250.0	3.93
YSQ-02B-18	0.57	3.05	14.59	0.21	0.2910	0.0089	0.0399	0.0004	259.0	6.97	252.0	2.77
YSQ-02B-21	0.15	0.98	1.76	0.56	0.6431	0.0323	0.0743	0.0015	504.0	19.97	462.0	8.72

(续表 1)

测点	元素含量 ($\mu\text{g/g}$)			Th/U	同位素比值				同位素年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
辉绿岩												
YS18-007-01	0.29	12.33	6.09	2.02	0.1385	0.0075	0.0205	0.0004	132.0	6.64	131.0	2.37
YS18-007-02	0.42	18.48	7.51	2.46	0.1492	0.0070	0.0212	0.0004	141.0	6.16	136.0	2.31
YS18-007-03	1.22	1.74	6.09	0.28	1.9943	0.0507	0.1906	0.0027	1114.0	17.20	1124.0	14.54
YS18-007-06	0.71	0.28	11.71	0.02	0.5384	0.0155	0.0703	0.0008	437.0	10.20	438.0	5.05
YS18-007-09	0.18	2.67	6.11	0.44	0.1706	0.0084	0.0243	0.0004	160.0	7.29	155.0	2.40
YS18-007-10	0.06	3.17	7.01	0.45	0.0593	0.0041	0.0086	0.0002	58.5	3.97	55.1	1.09
YS18-007-11	0.26	2.42	8.46	0.29	0.2455	0.0130	0.0325	0.0006	223.0	10.58	206.0	3.80
YS18-007-12	0.56	9.99	10.54	0.95	0.2498	0.0084	0.0343	0.0004	226.0	6.82	218.0	2.46
YS18-007-13	1.53	2.96	4.31	0.69	3.4998	0.0975	0.2515	0.0034	1527.0	22.02	1446.0	17.44
YS18-007-14	0.42	1.87	4.02	0.47	0.6905	0.0280	0.0799	0.0010	533.0	16.84	495.0	5.79
YS18-007-16	0.28	11.65	5.54	2.10	0.1458	0.0113	0.0201	0.0004	138.0	10.01	128.0	2.36
YS18-007-19	0.28	11.01	5.58	1.97	0.1636	0.0163	0.0224	0.0008	154.0	14.26	143.0	5.04
YS18-007-23	0.23	8.84	5.09	1.74	0.1437	0.0082	0.0217	0.0005	136.0	7.25	139.0	2.85
YS18-007-25	0.83	16.24	27.92	0.58	0.1640	0.0110	0.0223	0.0005	154.0	9.63	142.0	3.02
YS18-007-32	0.11	4.73	2.85	1.66	0.1323	0.0121	0.0182	0.0004	126.0	10.84	116.0	2.52

4 讨论

4.1 岩体形成时代及其对构造背景的指示

陈衍景等^[1]提出矿床是岩石圈板块运动与演化的产物,是研究地球动力学的有效探针。20世纪90年代前人通过 K-Ar 法得出玉水矿区的辉绿岩和花岗斑岩成岩年龄:何耀基^[2]报道辉绿岩的 K-Ar 年龄为 150.0 Ma,系燕山期产物;陈炳辉等^[10]认为该辉绿岩与成矿关系密切,并提出燕山期岩浆热液成矿的观点;蔡锦辉等^[6]则认为矿床形成于印支期,矿石硫化物 Sm-Nd 同位素年龄为(189.7 \pm 4.8) Ma,成矿时代早于燕山运动期而晚于石炭纪成岩期;花岗斑岩全岩 K-Ar 年龄为 108.3 Ma,辉绿岩分为早、晚两期,全岩 K-Ar 年龄分别为 150.0 Ma 和 131.3 Ma;Huang *et al.*^[8]报道玉水矿床黄铜矿的成矿年龄(308 \pm 15 Ma, MSWD=2.4),明显远早于前人所得出的辉绿岩年龄。从野外矿体、花岗斑岩和辉绿岩的穿插关系看,花岗斑岩和辉绿岩均切割了主矿体,花岗斑岩和辉绿岩中均未发现黄铜矿化、铅锌矿化等矿化现象,因而两期岩体的侵位时间应晚于成矿时间。在钻孔岩芯中也观察到花岗斑岩明显被辉绿岩穿插^[10],表明辉绿岩可能是矿区内最后一期岩浆活动,明显与前人报道的年龄不符。由于锆石 U-Pb 年龄比全岩 K-Ar 法年龄的精度和可靠性更高,

故本次得到的年龄能对两期岩体的形成时代进行更精确的限定。

中生代以来,中国东南部存在多期不连续的岩石圈伸展和地壳拉张作用^[13-17],且具有明显的周期性^[17]。玉水矿床花岗斑岩年龄与胡瑞忠等^[17]提出中国东南部存在 6 期地壳活动中 125 Ma 地壳拉张时间一致,岩石地球化学分析显示为地壳重熔的 S 型花岗岩^[18],暗示该花岗斑岩极可能属于华南白垩纪四次重要拉张活动的产物之一。

在岩浆岩中,锆石可能具有多种成因和来源,主要包括:(1)在形成过程结晶形成;(2)在上升侵位过程中从围岩捕获;(3)通过变质重结晶作用形成^[19-20]。玉水矿区辉绿岩的锆石年龄分布范围宽泛(1776.3~56.4 Ma),除了岩浆本身在结晶过程中所形成的锆石外,还有可能在侵位过程中捕获了来自于围岩或岩体中的锆石而致使锆石年龄分布范围较大。辉绿岩锆石年龄主要集中在最晚一组(87.0~56.3 Ma, $n = 13$),其锆石环带较宽,指示可能为高温环境下结晶形成,与典型基性岩中的锆石特征相符^[20-21],显示其加权平均年龄((59.3 \pm 2.5) Ma)可代表该辉绿岩脉的真实形成年龄。

华南地区中生代主要经历过 4 次地壳拉张作用,分别是约 140 Ma、约 124 Ma、约 105 Ma 和约 90 Ma^[13,22,23],玉水辉绿岩脉则与胡瑞忠等^[17]提出的约 50 Ma 拉张期一致。玉水矿床辉绿岩的结晶年

龄为(59.3±2.5) Ma, 与张贵山^[16]在闽东南发现的 57.9 Ma 侵入的基性岩脉(赤湖辉长岩脉)相一致; 朱炳泉等^[24]研究表明中国东南部古新世晚期(56 Ma)发生明显的拉张裂隙向裂谷转换; 谢桂青^[14]认为江西省中部存在 50~60 Ma 的地壳拉张事件, 本次研究为中国东南部存在 50~60 Ma 地壳拉张事件增添了新的年龄证据。

闽东南的基性岩脉 Zr/Y 比值为 4.7~11.0, 指示大陆弧构造环境, Th/Hf-Ta/Hf 构造判别图解上基性岩脉均落在大陆拉张带区域内, 指示基性岩脉形成的动力学背景为陆缘拉张带^[16]。玉水辉绿岩岩石地球化学特征与赤湖辉长岩脉相似, 表明其也可能形成于大陆拉张(或陆内裂谷)环境^[8,18]。玉水辉绿岩和闽东南基性岩脉的侵入与区域地壳拉张时间具有耦合关系, 暗示古新世永梅坳陷基性岩脉与闽东南最晚一期基性岩浆活动可能属于同一期地壳拉张事件。但这明显晚于同样出于伸展环境下的梅州霞岚岩体, 该岩体由辉长岩和酸性花岗岩组成, SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄值花岗岩(196±2) Ma, 辉长岩(195±1) Ma^[25]。

4.2 辉绿岩继承锆石的地质意义

辉绿岩继承锆石的 U-Pb 年龄谱图具有 9 个峰值年龄(图 7), 分别是 1723 Ma、1523 Ma、1123 Ma (元古宙), 529 Ma (寒武纪), 441 Ma (志留纪), 258 Ma (晚二叠世), 223 Ma (晚三叠世), 164 Ma (中侏罗世) 和 135 Ma (早白垩世)。

华夏地块以政和-大埔断裂为界分为东、西华夏地块^[26], 玉水铜多金属矿床位于西华夏地块。东华夏地块基底年龄主要是古元古代和少量太古宙;

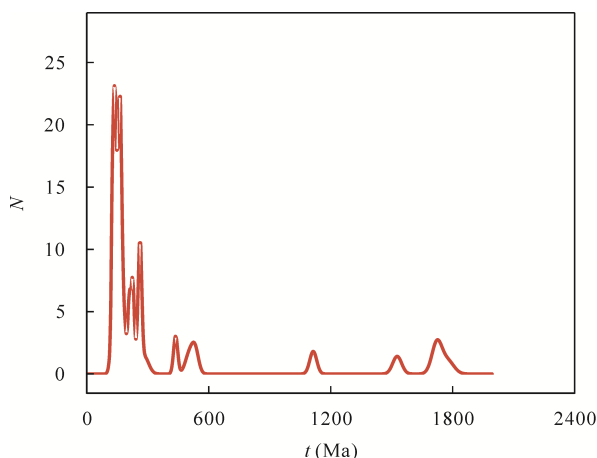


图 7 辉绿岩继承锆石年龄分布图

Fig.7 Age distribution diagram for zircons from granite porphyry and diabase

西华夏地块主要形成于新元古代, 含少量太古宙到中元古代物质^[27]。Li *et al.*^[28]认为华夏地块的高级变质-结晶基底是通过 3.3~2.5 Ga 太古宙地壳物质再造和 1.9~1.8 Ga 期间新生地壳物质增生形成的, 1.9~1.8 Ga 和 1.1~0.96 Ga 则是华夏地块两个明显的新生地壳增长时期。华夏地块中前寒武纪的岩浆岩年龄为 1.9~1.8 Ga、1.4 Ga、0.97 Ga 和 0.8~0.7 Ga^[28-30]。玉水矿床辉绿岩的元古宙继承锆石年龄(1723 Ma、1523 Ma 和 1123 Ma)从时间上看与华夏地块新生地壳增长时期和前寒武纪岩浆岩形成时间相近, 显示玉水矿区辉绿岩中老锆石可能来自华夏地块的古老基底, 这与西华夏地块具有新生物质、再循环的古元古代到中元古代地壳物质的混合来源相一致。寒武纪-志留纪继承锆石年龄(529~441 Ma)与中国东南部砂岩中碎屑锆石年龄峰值范围相近(446 Ma、447 Ma、437 Ma、448 Ma、441 Ma)^[28], 指示在区域上该时期可能处于平静期, 也鲜有构造运动或岩浆事件的报道, 因而该组继承锆石可能来自于区域上砂岩中的碎屑锆石, 代表辉绿岩在上升过程中捕获了沉积围岩的锆石。

中二叠世至中侏罗世(270~190 Ma), 中国东南部处于印支期造山运动中^[31-32], 中侏罗世(190 Ma)后南岭处于燕山早期的板内岩浆活动^[33], 主要发育造山期后岩浆岩。在板内岩浆活动的第 I 阶段(180~170 Ma)主要形成以 A 型花岗岩为代表的火成岩, 为板内非造山型火成岩; 随后在第 II 阶段(165~150 Ma)发生大规模的以 I 型花岗岩为主、伴随小规模 A 型花岗岩的岩浆活动, 指示该时期可能处于岩石圈伸展的构造背景^[34-37]。对于研究区外围的梅州早侏罗世霞岚杂岩体, 虽然邢光福等^[38]得到的 Rb-Sr 年龄为 165~164 Ma, 但余心起等^[25]通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年得到霞岚岩体中花岗岩年龄为(196±2) Ma, 辉长岩为(195±1) Ma, 表明太平洋构造域在 195 Ma 左右开始作用于华南地区; 结合其岩石地球化学特征, 有人认为该杂岩体是燕山早期(早侏罗世)太平洋板块俯冲作用导致弧后伸展的岩浆作用产物^[39]。玉水辉绿岩中晚二叠世(258 Ma)、晚三叠世(223 Ma)和侏罗纪(164 Ma)继承锆石年龄与印支造山运动发生的时间大致相符, 暗示继承锆石可能来自于与印支运动同期形成的各类岩浆岩。

在 140 Ma 之后进入活跃期, 中国东南部地壳以岩石圈伸展运动为主, 岩浆活动较频繁。李献华等^[13]提出粤北白垩纪基性岩脉年龄形成于约 140 Ma、约

105 Ma 和约 90 Ma 3 个阶段, 结合区域上构造演化认为华南在白垩纪以拉张为主; Li^[40]认为在中生代古太平洋板块主要存在 4 次伸展运动(146~136 Ma、129~122 Ma、109~101 Ma 和 97~87 Ma); 胡瑞忠等^[17]和赵军红^[15]则认为中国东南部晚白垩世以来存在 6 期地壳拉张运动(140~135 Ma、120~115 Ma、105 Ma、95~85 Ma、75~70 Ma 和 55~45 Ma); 张贵山^[16]也指出闽东南基性岩脉的侵入与中国东南部存在约 75 Ma、约 85 Ma、90~100 Ma、110~120 Ma、125 Ma 和 180~165 Ma 的多期地壳拉张作用具有耦合关系, 形成的背景为陆缘拉张环境。因而, 玉水矿床辉绿岩中 135 Ma 的继承锆石年龄与我国东南部早白垩世地壳拉张运动期相符, 间接记录了梅州地区永梅拗陷早白垩世的构造岩浆活动事件。

5 结 论

(1) 永梅拗陷带中的玉水铜多金属矿床共经历了早白垩世和早古近纪的 2 期岩浆活动, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为花岗斑岩(128.4±1.0) Ma (MSWD = 2.6, $n = 26$)、辉绿岩(59.3±2.5) Ma (MSWD = 3.1, $n = 13$);

(2) 玉水铜多金属矿床中形成 2 期岩体的区域动力学背景均为伸展拉张环境;

(3) 矿床中花岗斑岩和辉绿岩锆石年龄与华南地区多期地壳拉张活动时间相耦合, 暗示永梅拗陷也在同期经历了地壳拉张事件, 并为中国东南部存在 50~60 Ma 地壳拉张事件提供了新的年龄证据。

两位审稿人对本文进行了认真仔细的审阅并提出了宝贵意见, 正是他们的建设性意见使得本文质量得以提高, 在此一并致以衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] 陈衍景, 肖文交, 张进江. 成矿系统: 地球动力学的有效探针[J]. 中国地质, 2008, 35(6): 1059-1073.
Chen Yan-jing, Xiao Wen-jiao, Zhang Jin-jiang. Ore-systems as a geodynamic probe [J]. Geol China, 2008, 35(6): 1059-1073 (in Chinese with English abstract).
- [2] 何耀基. 广东梅县玉水热液沉积多金属矿床的成矿地质特征[J]. 广东地质, 1990, 5(1): 1-13.
He Yao-ji. Metallogenic-geological characteristics of Yushui hydrothermal sedimentary polymetallic deposit in Meixian County, Guangdong Province [J]. Guangdong Geol, 1990, 5(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- [3] 何耀基. 梅县玉水铜铅锌(银)矿床成矿机制及找矿标志[J].

广东地质, 1998, 13(2): 65-71.

He Yao-ji. Ore-forming mechanism and ore guide of the Yushui copper-lead-zinc (silver) deposit in Meixian [J]. Guangdong Geol, 1998, 13(2): 65-71 (in Chinese with English abstract).

- [4] 汪礼明, 杨牧, 彭省临. 广东梅县玉水多金属矿床成因探讨[J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23(4): 345-352.
Wang Li-ming, Yang Mu, Peng Sheng-lin. On the genesis of the Yushui polymetallic deposit in Meixian County, Guangdong Province [J]. Geotecton Metallogen, 1999, 23(4): 345-352 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陈文强. 玉水铜多金属矿床的成矿地质特征及深部找矿浅析[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(6): 755-759.
Chen Wen-qiang. Geology of Yushui copper polymetal deposit and the ore prospecting in deep ground [J]. Resour Environ Eng, 2006, 20(6): 755-759 (in Chinese with English abstract).
- [6] 蔡锦辉, 刘家齐. 广东永梅拗陷南段成矿区构造特征及找矿方向[J]. 大地构造与成矿学, 1996, 20(4): 333-339.
Cai Jin-hui, Liu Jia-qi. Characteristics of structures and prospecting targets in the metallogenic province at the south sector of Yongmei depression, Guangdong [J]. Geotecton Metallogen, 1996, 20(4): 333-339 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘家齐. 广东梅县玉水富铜多金属矿床温压地球化学特征、成矿时代及成因研究[J]. 华南地质与矿产, 1997(1): 37-50.
Liu Jia-qi. Thermobarogeochemistry, ore-forming age and genesis study for the Yushui copper-rich multimetal deposit in Meixian County, Guangdong Province [J]. Geol Mineral Resour South China, 1997 (1): 37-50 (in Chinese with English abstract).
- [8] Huang Y, Sun X M, Shi G Y, Sa R N, Guan Y, Jiang X D, Que H H. Re-Os dating of sulphides from the Yushui Cu-polymetallic deposit in eastern Guangdong Province, South China [J]. Ore Geol Rev, 2015, 70: 281-289.
- [9] 蒋斌斌, 祝新友, 程细音, 王海. 广东玉水铜多金属矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2163-2172.
Jiang Bin-bin, Zhu Xin-you, Cheng Xi-yin, Wang Hai. Characteristics and geological significance of fluid inclusions in the Yushui copper polymetallic deposit, Guangdong Province [J]. Geol China, 2016, 43(6): 2163-2172 (in Chinese with English abstract).
- [10] 陈炳辉, 陈敬德, 郭锐, 俞受黎. 广东梅县玉水铜多金属矿床成因[J]. 广东地质, 1992, 7(3): 59-69.
Chen Bing-hui, Chen Jing-de, Guo Rui, Yu Shou-jun. The genesis of Yushui copper-polymetallic deposit in Meixian County, Guangdong Province [J]. Guangdong Geol, 1992, 7(3): 59-69 (in Chinese with English abstract).
- [11] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [12] Hu Z C, Liu Y S, Chen L, Zhou L, Li M, Zong K Q, Zhu L Y, Gao S. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS

- analysis at high spatial resolution [J]. *J Anal Atom Spect*, 2011, 26(2): 425–430.
- [13] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. *地球化学*, 1997, 26(2): 14–31.
Li Xian-hua, Hu Rui-zhong, Rao Bing. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China [J]. *Geochimica*, 1997, 26(2): 14–31 (in Chinese with English abstract).
- [14] 谢桂青. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2003: 1–126.
Xie Gui-qing. Late Mesozoic and Cenozoic mafic dikes (bodies) from southeastern China: Geological and geochemical characteristics and its geodynamics — A case of Jiangxi Province [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2003: 1–126 (in Chinese with English abstract).
- [15] 赵军红. 福建省基性岩的年代学和地球化学: 晚中生代以来中国东南部地幔演化[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2004: 1–107.
Zhao Jun-hong. Chronology and geochemistry of mafic rocks from Fujian Province: Implications for the mantle evolution of SE China since Late Mesozoic [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2004: 1–107 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张贵山. 福建晚中生代以来基性-超基性岩的年代学、地球化学及其地球化学动力学意义[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006: 1–109.
Zhang Gui-shan. Chronology, geochemistry and geodynamic significance of the mafic-ultramafic rocks in Fujian Province since Late Mesozoic [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2006: 1–109 (in Chinese with English abstract).
- [17] 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 彭建堂, 李朝阳. 华南白垩-第三纪地壳拉张与铀成矿关系[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 153–160.
Hu Rui-zhong, Bi Xian-wu, Su Wen-chao, Peng Jian-tang, Li Chao-yang. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China [J]. *Earth Sci Front*, 2004, 11(1): 153–160 (in Chinese with English abstract).
- [18] 黄毅, 孙晓明, 石贵勇, 翟伟, 关瑶, 蒋晓东, 萨日娜, 李如操, 阙洪华. 粤东玉水铜多金属矿床地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2013, 33(增刊 2): 453–454.
Huang Yi, Sun Xiao-ming, Shi Gui-yong, Zhai Wei, Guan Yao, Jiang Xiao-dong, Sa Ri-na, Li Ru-cai, Que Hong-hua. Geochemistry characteristics of Yushui copper-polymetallic deposit [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2013, 33(Suppl 2): 453–454 (in Chinese).
- [19] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 27–62.
- [20] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589–1604.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genetic mineralogy of zircon and its constraints to the interpretation of U-Pb dating [J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- [21] Corfu K, Hancher J M, Hoskin P W O, Kinny P. Atlas of zircon textures [J]. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 469–500.
- [22] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China [J]. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18(3): 293–306.
- [23] Martin H, Bonin B, Capdevil R, Jahn B M, Lameyre J, Wang Y. The Kuiki peralkaline granitic complex (SE China): Petrology and geochemistry [J]. *J Petrol*, 1994, 35(4): 983–1015.
- [24] 朱炳泉, 王慧芬, 陈毓蔚, 常向阳, 胡耀国, 谢静. 新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究[J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 213–221.
Zhu Bing-quan, Wang Hui-fen, Chen Yu-wei, Chang Xiang-yang, Hu Yao-guo, Xie Jing. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia [J]. *Geochimica*, 2002, 31(3): 213–221 (in Chinese with English abstract).
- [25] 余心起, 狄永军, 吴琰国, 张达, 郑勇, 代堰铭. 粤北存在早侏罗世的岩浆活动——来自霞岚杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 2009, 39(6): 681–693.
Yu Xinqi, Di Yongjun, Wu Ganguo, Zhang Da, Zheng Yong, Dai Yanpei. The Early Jurassic magmatism in northern Guangdong Province, southeastern China: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating of Xialan complex [J]. *Sci China (D)*, 2009, 52(4): 471–483.
- [26] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. *Tectonophysics*, 1998, 284(1/2): 101–133.
- [27] Xu X S, O'reilly S Y, Griffin W L, Wang X L, Pearson N J, He Z Y. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes [J]. *Precamb Res*, 2007, 158(1/2): 51–78.
- [28] Li X H, Li Z X, He B, Li W X, Li Q L, Gao Y Y, Wang X C. The Early Permian active continental margin and crustal growth of the Cathaysia Block: *In situ* U-Pb, Lu-Hf and O isotope analyses of detrital zircons [J]. *Chem Geol*, 2012, 328: 195–207.
- [29] 李献华, 李武显, 何斌. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(6): 543–559.
Li Xian-hua, Li Wu-xian, He Bin. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests [J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2012, 31(6): 543–559 (in Chinese with English abstract).
- [30] Li X H, Li Z X, Li W X, Wang Y. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on the Hainan Island [J]. *J Geol*, 2006, 114: 341–353.
- [31] 李武显, 周新民. 古太平洋岩石圈消减与中国东南部晚中生代火成岩成因——岩石圈消减与玄武岩底侵相结合模式的补充证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2001, 25(1): 55–63.
Li Wu-xian, Zhou Xin-min. Subduction of the paleo-Pacific plate and origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China — Some supplement evidences for the model of lithosphere subduction and underplating of mafic magma [J].

- Geotecton Metallogen, 2001, 25(1): 55–63 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王德滋, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗质火山岩-侵入杂岩成因与地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1–295. Wang De-zi, Zhou Xin-min. Petrogenesis of Granitic Volcanic Rocks-Intrusive Complex and Evolution of Earth Crust during Late Mesozoic in Southeastern China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 1–295 (in Chinese).
- [33] 秦社彩, 范蔚茗, 郭峰, 李超文, 高晓峰. 浙闽晚中生代辉绿岩脉的岩石成因: 年代学与地球化学制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3295–3306. Qin She-cai, Fan Wei-ming, Guo Feng, Li Chao-wen, Gao Xiao-feng. Petrogenesis of Late Mesozoic diabase dikes in Zhejiang-Fujian provinces: Constrains from Ar-Ar dating and geochemistry [J]. Acta Perol Sinica, 2010, 26(11): 3295–3306 (in Chinese with English abstract).
- [34] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogeny and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. Geology, 2007, 35(2): 179–182.
- [35] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 2007, 52(9): 981–991. Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China [J]. Chinese Sci Bull, 2007, 52(14): 1873–1885.
- [36] Halls H C. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic [J]. Geosci Can, 1982, 9(3): 145–154.
- [37] Halls H C, Fahrig W C. Mafic Dyke Swarms [M]. Geological Society of Canada, Special Paper 34. Geological Society of Canada, 1987: 1–501.
- [38] 邢光福, 杨祝良, 孙强辉, 沈加林, 陶奎元. 广东梅州早侏罗世层状基性-超基性岩体研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(3): 172–175. Xing Guang-fu, Yang Zhu-liang, Sun Qiang-hui, Shen Jia-lin, Tao Kui-yuan. Early Jurassic layered mafic-ultramafic intrusions in Meizhou, Guangdong Province [J]. Bull Mineral Petrol Geochem, 2001, 20(3): 172–175 (in Chinese with English abstract).
- [39] 范蔚茗, 王岳军, 郭峰, 彭头平. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 159–169. Fan Wei-ming, Wang Yue-jun, Guo Feng, Peng Tou-ping. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi provinces and the lithospheric extension [J]. Earth Front, 2003, 10(3): 159–169 (in Chinese with English abstract).
- [40] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China [J]. J Asian Earth Sci, 2000, 18: 293–305.