

湘东北井冲钴铜矿区连云山花岗岩的岩石成因 ——锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学和 Hf 同位素约束

张 鲲¹, 徐德明¹, 宁钧陶², 胡俊良¹, 卢友月¹, 黄 皓¹, 胡 军¹, 陕 亮¹

(1. 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 湖南省地质矿产勘查开发局 402 队, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 对湘东北井冲钴铜矿区连云山细粒二云母二长花岗岩和中细粒黑云母花岗闪长岩进行了锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Hf 同位素分析研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 花岗岩的成岩年龄为 149.4 ± 1.1 Ma。岩石属强过铝质高钾钙碱性-钙碱性系列, 富集 Th、U、Pb 等元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 等元素, 稀土元素球粒陨石标准化配分模式为右倾型, Eu 表现为强烈到弱亏损。岩石中燕山期锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,314 \sim 0.282\,461$, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-13.0 \sim -7.8$, Hf 同位素二阶段模式年龄在 $2\,018 \sim 1\,690$ Ma 之间。综合分析结果显示, 岩石来源于下地壳岩石部分熔融。

关键词: 钦杭成矿带; 连云山岩体; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 岩石化学

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)01-0021-13

Petrogenesis of the Lianyunshan granites in Jingchong Co-Cu polymetallic deposit in northeastern Hunan: Constraints from zircon U-Pb chronology, petrochemistry and Hf isotope

ZHANG Kun¹, XU De-ming¹, NING Jun-tao², HU Jun-liang¹, LU You-yue¹, HUANG Hao¹,
HU Jun¹ and SHAN Liang¹

(1. Wuhan Center of Geological Survey, Wuhan 430205, China; 2. No. 402 Geological Party, Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources, Changsha 410004, China)

Abstract: In this paper, the authors studied the zircon U-Pb isotope chronology, whole rock geochemistry and Hf isotopes of the fine-grained two-mica monzonitic granite and medium fine-grained biotite granodiorite of the Lianyunshan granite from the Jingchong Co-Cu polymetallic deposit in northeastern Hunan Province. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded crystallization ages of 149.4 ± 1.1 Ma for the fine-grained two-mica monzonitic granite of the Lianyunshan granite. The rocks belong to a peraluminous high-Al calc-alkaline intrusive granite. These rocks are characterized by high Th, U and Pb content and low Nb, Ta, Zr and Ti content. The REE distribution patterns show the right-inclined type, with strongly negative Eu anomalies to weakly negative Eu anomalies. The Hf isotope analytical results show that the $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ values of the Yanshanian zircons are between $0.282\,314$ and $0.282\,461$, whereas the $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values of the late Yanshanian zircons are between -13.0 and -7.8 , with the two stage Hf model ages ranging from $2\,018$ to $1\,690$ Ma, which indicates that its parental magma was derived from partial melting of rocks of ancient crust.

Key words: Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt; Lianyunshan granite; zircon U-Pb dating; Hf isotopes; petrochemistry

收稿日期: 2017-11-26; 接受日期: 2018-10-25; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0600205); 中国地质调查局地质矿产调查评价专项项目(1212011085405, 1212011085416, 12120113067200, DD20160334)

作者简介: 张 鲲(1982-), 男, 高级工程师, 从事地质与矿产调查研究, E-mail: zhangkun019@163.com。

网络首发时间: 2018-12-12; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20181211.1656.005.html>

Fund support: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0600205) ; Project of China Geological Survey (1212011085405, 1212011085416, 12120113067200, DD20160334)

钦杭结合带是扬子和华夏古板块碰撞拼接带,自钦州湾经湘中、赣中至杭州湾,钦杭成矿带是沿着钦杭结合带两侧扩展而新圈定的一个重要成矿带(杨明桂等, 1997; 徐德明等, 2012)。该带成矿地质条件优越,分布着一大批铜金铅锌多金属矿床,是华南地区重要的多金属成矿带,系统研究解剖区内典型矿床,对总结区域成矿规律和指导下一步找矿具有重要的意义。

井冲钴铜多金属矿床位于浏阳市社港镇,是钦杭成矿带上的典型钴铜矿床之一(徐德明等, 2012)。矿区地质工作可以追溯到20世纪50年代,2004年完成了区内1:5万区域地质调查,2008年完成了地质详查,矿产远景达到了中型规模。井冲钴铜多金属矿产于连云山岩体的北西侧接触带,1:5万区域地质调查获得的硫同位素数据表明矿石硫来源于深部岩浆,岩浆活动为成矿提供了需要的热源和物质来源,岩浆作用伴随着成矿作用(彭和求等, 2004^①; 易祖水等, 2010)。矿区内岩浆岩主要为连云山岩体,学者们报道了连云山岩体部分区域不同岩性锆石 U-Pb 年龄(Wang *et al.*, 2016; 许德如等, 2017; Deng *et al.*, 2017),它们集中在152.9~139.6 Ma。在前人工作的基础上,本文对社港镇周洛地区出露的连云山岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学和 Hf 同位素分析研究,补充了细粒二云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄,并结合岩石地球化学和 Hf 同位素分析探讨了岩石成因,为完善连云山岩体年代学格架和深入研究矿床成因提供重要的科学依据。

1 地质背景

井冲钴铜矿区位于钦杭成矿带中段、下扬子陆块江南古岛弧北缘、长平大断裂南东侧(贾宝华等, 2003^②; 彭和求等, 2004^①; 赵小明等, 2013^③)。区域出露的地层主要有古元古界连云山杂岩、新元古界冷家溪群、中生界白垩系—古近系(图1)。连

云山杂岩为结晶变质岩系,是由砂、泥碎屑沉积岩,火山碎屑沉积岩,中基性岩浆岩和富云母类斜长花岗岩等经区域角闪岩相变质的杂岩,岩性主要为二云母片岩、二云母石英片岩、黑云母片岩、斜长角闪片岩等,还出露一些片岩残留体,为混合岩化作用改造产物。新元古界冷家溪群为一套浅变质岩系,岩性主要为板岩、粉砂质板岩、变质砂岩等。中生界白垩系—古近系主要为紫红色厚层块状砾岩夹砂砾岩。区内北东向断裂发育,主要断裂为中部出露的北东向长平大断裂。长平断裂是长寿街—双牌区域断裂带重要组成部分,断裂总体倾向北西,倾角23°~45°,地表局部倾角达75°。区内岩浆活动极为强烈,主体为连云山花岗岩体,侵位于连云山杂岩之中,西边界以断层为主,有少量的岩脉穿插,覆盖冷家溪群和白垩系;东边界与连云山杂岩呈侵入接触关系,岩枝穿插、切割连云山杂岩的片理面。在岩体东、西两侧近围岩附近,黑云母、长英质矿物具定向排列。1:5万洋春—官渡幅区域地质调查初步确定连云山岩体有3次侵位(彭和求等, 2004)^①,第1次形成细—中细粒黑云母花岗闪长岩,第2次形成中粒斑状黑云母二长花岗岩,第3次形成细—中细粒二云母二长花岗岩,从早到晚,黑云母含量由多到少。

井冲钴铜矿体赋存于长平大断裂中段构造—热液硅化构造石英角砾岩、硅质构造角砾岩、硅化绿泥石岩中。矿体长约200 m,宽20~30 m,向南西侧伏下延,倾伏角约20°,其长轴方向与构造热液蚀变岩带走向呈约25°的夹角。矿体在剖面上呈透镜状产出,产出层位稳定。在侧伏方向上,呈尖灭再现或尖灭侧现分布,受构造控制明显。矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、白铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、毒砂、斑铜矿、辉铜矿、自然铜、辉钴矿等,脉石矿物有石英、绿泥石等。与矿化有关的围岩蚀变主要为硅化、绿泥石化,次为碳酸盐化等。金属矿化与硅化关系密切,黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、铁闪锌矿均直接赋存于硅化岩中(彭和求等, 2004^①; 易祖水等, 2010)。

① 彭和求, 陈俊, 何江南, 等. 2004. 1:5万洋春—官渡幅区域地质调查报告.

② 贾宝华, 彭和求, 陈俊, 等. 2003. 1:25万长沙市幅区域地质调查报告.

③ 赵小明, 张开明, 毛新武, 等. 2013. 中南地区矿产资源潜力评价成矿地质背景研究报告.

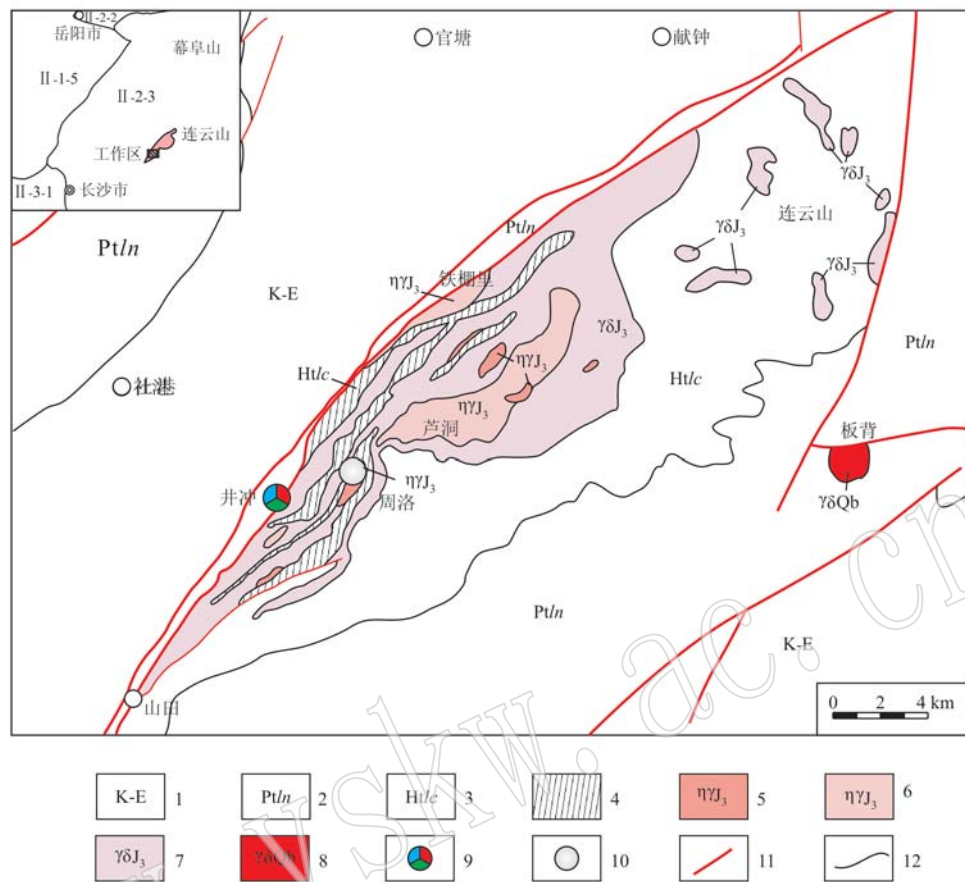


图 1 连云山地区地质简图[据彭和求等(2004)^①修编]

Fig. 1 Geological sketch map of the Lianyunshan area(modified after Peng Heqiu *et al.*, 2004)^①

1—白垩系-古近系; 2—冷家溪群; 3—连云山杂岩; 4—片岩残留体; 5—二云母二长花岗岩($\eta\gamma J_3$); 6—黑云母二长花岗岩($\eta\gamma J_3$); 7—黑云母花岗闪长岩($\gamma\delta J_3$); 8—雪峰期花岗闪长岩; 9—井冲多金属矿; 10—采样位置; 11—断裂; 12—地质界线; II-1-5—江汉-洞庭断陷盆地; II-2-2—下扬子被动陆缘; II-2-3—江南古岛弧; II-3-1—湘中-桂中裂谷盆地

1—Cretaceous-Paleogene; 2—Lengjiayi Group; 3—Lianyunshan complex; 4—schist remnants; 5—two-mica monzonitic granite($\eta\gamma J_3$); 6—biotite monzogranite($\eta\gamma J_3$); 7—biotite granodiorite($\gamma\delta J_3$); 8—Xuefeng granodiorite; 9—Jingchong polymetallic ore; 10—sampling position; 11—fault; 12—geological boundary; II-1-5—Jiangnan-Dongting fault basin; II-2-2—Lower Yangtze passive continental margin; II-2-3—Jiangnan ancient island arc; II-3-1—Central Hunan-Central Guangxi rift basin

2 岩石学特征

连云山花岗岩样品均采于社港镇周洛风景区一带。通过观察手标本和显微照片特征, 鉴定花岗岩岩性为细粒二云母二长花岗岩和中细粒黑云母花岗闪长岩。细粒二云母二长花岗岩呈灰白色, 细粒花岗结构, 块状构造, 矿物粒径 0.5 ~ 1 mm, 矿物成分为石英(30% ~ 35%)、钾长石(30% ~ 35%)、斜长石(30% ~ 35%)、黑云母(2% ~ 3%, 墨水蓝异常干涉色)、白云母(3% ~ 4%, 蓝绿干涉色)(图2a)。

中细粒黑云母花岗闪长岩呈灰白色, 中细粒花岗结构, 块状构造, 矿物粒径 0.5 ~ 3 mm, 矿物成分为石英(22% ~ 26%, 破碎严重)、斜长石(36% ~ 40%, 多发生绢云母化)、钾长石(24% ~ 28%, 粒径 2 ~ 3 mm, 蚀变较弱)、黑云母(8% ~ 12%, 局部绿泥石化, 表现出“柏林蓝”的异常干涉色)(图2b)。

3 分析测试方法

本文选取了 5 个连云山花岗岩样品进行了岩石地球化学分析, 并选取了代表性的细粒二云母二长

① 彭和求, 陈 俊, 何江南, 等. 2004. 1:5 万洋春-官渡幅区域地质调查报告.

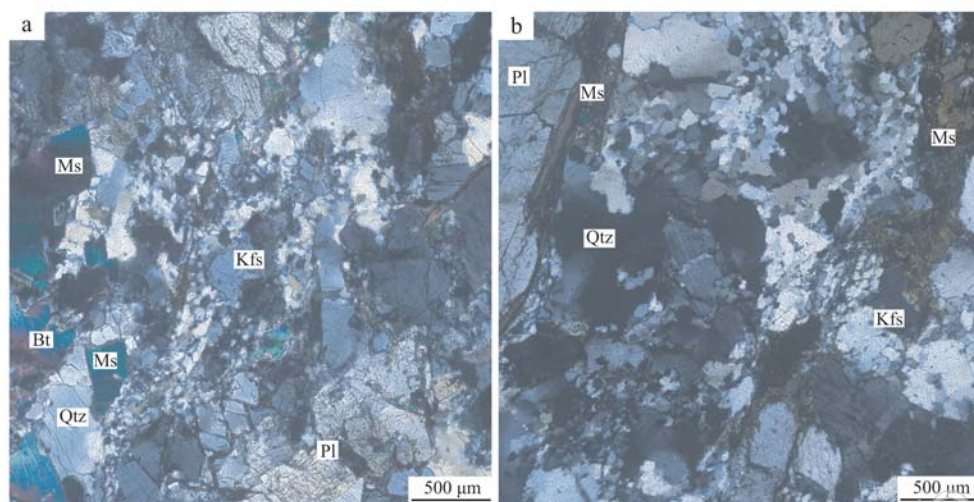


图2 连云山花岗岩显微照片(正交偏光)

Fig. 2 The microscopic photographs of Lianyunshan granite (crossed nicols)

a—二云母二长花岗岩; b—黑云母花岗岩闪长岩; Qtz—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母; Ms—白云母

a—two-mica monzonitic granite; b—biotite granodiorite; Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—potash feldspar; Bt—biotite; Ms—muscovite

花岗岩样品 JC4-1 进行了锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素原位分析。

岩石地球化学样品主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法,微量元素分析采用 ICP-MS 法,均在中国地质调查局武汉地质调查中心中南矿产资源监督检查中心进行,图解生成和地球化学参数计算使用 GeoKit 软件(路远发, 2004)完成。

测年样品破碎和锆石挑选由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。锆石 CL 图像在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室拍摄,并结合透射光和反射光图像观察锆石内部结构。

测年样品锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)LA-ICP-MS 仪器上完成,仪器型号为 Agilent 7500a,激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,激光剥蚀斑束直径为 32 μm 。分析数据的处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成,分析步骤和流程同 Liu 等(2008, 2010)。花岗岩锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot3.0(Ludwig, 2003)完成。

测年样品锆石 Hf 同位素原位分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的多接收电感耦合等离子质谱仪 MC-ICP-MS(Nu Plasma)上完成,采用 He

作为剥蚀物质载气,激光束斑直径 42 μm ,分析步骤和流程同徐平等(2004)和 Yuan 等(2008)。采用标准锆石 91500、MON-1 和 GJ-1 作标样,分析的精度和误差用标样进行校准,误差为 2σ ,实验测试 91500 的分析结果 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值 $0.282\,307 \pm 0.000\,016$ 与参考值一致。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 分析结果

测年样品 JC4-1 阴极发光(CL)图像显示,锆石形态大部分呈短柱状,晶形比较完整,振荡环带发育,裂纹不发育(图3)。从制备好的测年样品中选取锆石进行测试,每颗锆石一个测点,多数测点位于锆石柱体两端,少部分测点在柱体中部。样品的同位素测年分析结果见表1。锆石 Th 含量 $258 \times 10^{-6} \sim 4\,884 \times 10^{-6}$, U 含量 $264 \times 10^{-6} \sim 5\,039 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.24 \sim 2.02$ 。锆石普遍具有较高的 Th、U 含量,结合振荡环带等特征表明其为岩浆锆石(吴元保等, 2004)。

共测试了 20 个测点,5 号点因同位素比值异常、谐和性差而被剔除,有效测点为 19 个。3、13 和 20 号点同位素比值 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值明显偏大,结合阴极发光图像分析,3 和 13 号测点应为继承锆石核,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 698.6 Ma 和 803.3 Ma;区内未

表 1 连云山细粒二云母二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb isotopic compositions of zircons for the Lianyungshan fine-grained two-mica monzonitic granite

分析点	$w_B/10^{-6}$				Th/U				同位素比值				年龄/Ma			
	Pb		Th		U				207Pb/235U		206Pb/238U		207Pb/206Pb		207Pb/235U	
								1 σ		1 σ		1 σ		1 σ		1 σ
1	202	1 839	2 950	0.62	0.046 08	0.001 77	0.150 31	0.005 88	0.023 45	0.000 33	400.1	-300.0	142.2	5.2	149.4	2.1
2	113	944	2 137	0.44	0.050 16	0.002 11	0.208 31	0.009 03	0.029 82	0.000 46	211.2	98.1	192.1	7.6	189.5	2.9
3	245	533	264	2.02	0.063 10	0.004 01	0.989 49	0.059 61	0.114 46	0.002 64	722.2	136.3	698.5	30.4	698.6	15.3
4	59	267	1 579	0.17	0.061 10	0.004 38	0.205 45	0.014 50	0.024 23	0.000 57	642.6	155.5	189.7	12.2	154.3	3.6
5	613	1 477	2 346	0.63	0.233 31	0.006 51	1.060 17	0.030 33	0.032 46	0.000 50	3 075.0	45.5	733.9	14.9	205.9	3.1
6	248	2 350	3 789	0.62	0.048 62	0.002 36	0.157 67	0.007 93	0.023 09	0.000 42	127.9	114.8	148.7	7.0	147.2	2.7
7	95	2 528	2 838	0.89	0.047 38	0.002 59	0.156 19	0.008 23	0.023 91	0.000 48	77.9	116.7	147.4	7.2	152.3	3.0
8	404	1 617	2 310	0.70	0.048 85	0.002 90	0.161 35	0.009 72	0.023 69	0.000 35	139.0	133.3	151.9	8.5	151.0	2.2
9	175	1 578	2 478	0.64	0.051 52	0.002 55	0.168 22	0.008 18	0.023 52	0.000 35	264.9	112.9	157.9	7.1	149.9	2.2
10	135	970	2 992	0.32	0.048 70	0.002 02	0.159 94	0.006 85	0.023 64	0.000 34	131.6	98.1	150.7	6.0	150.6	2.1
11	185	1 148	4 296	0.27	0.048 86	0.001 88	0.158 19	0.006 05	0.023 23	0.000 25	142.7	86.1	149.1	5.3	148.1	1.6
12	80	562	1 301	0.43	0.053 79	0.003 55	0.222 17	0.014 54	0.030 16	0.000 61	361.2	150.0	203.7	12.1	191.6	3.8
13	153	258	294	0.88	0.068 39	0.003 13	1.241 22	0.055 03	0.132 70	0.002 62	879.6	94.4	819.4	24.9	803.3	14.9
14	252	2 291	3 063	0.75	0.051 06	0.001 89	0.165 86	0.006 11	0.023 39	0.000 25	242.7	87.0	155.8	5.3	149.0	1.6
15	458	4 884	5 039	0.97	0.050 39	0.001 76	0.162 47	0.005 54	0.023 41	0.000 33	213.0	86.1	152.9	4.8	149.2	2.1
16	56	317	1 344	0.24	0.051 94	0.003 34	0.166 15	0.010 50	0.023 51	0.000 48	283.4	152.8	156.1	9.1	149.8	3.0
17	260	2 426	3 440	0.71	0.047 99	0.002 09	0.157 09	0.007 19	0.023 42	0.000 32	98.2	100.0	148.2	6.3	149.2	2.0
18	71	650	1 310	0.50	0.059 20	0.004 66	0.184 36	0.012 92	0.023 18	0.000 36	576.0	171.1	171.8	11.1	147.7	2.2
19	144	1 380	2 002	0.69	0.048 37	0.002 02	0.156 73	0.006 64	0.023 35	0.000 30	116.8	98.1	147.8	5.8	148.8	1.9
20	176	606	811	0.75	0.055 23	0.002 65	0.459 42	0.022 11	0.059 99	0.000 79	420.4	107.4	383.9	15.4	375.6	4.8

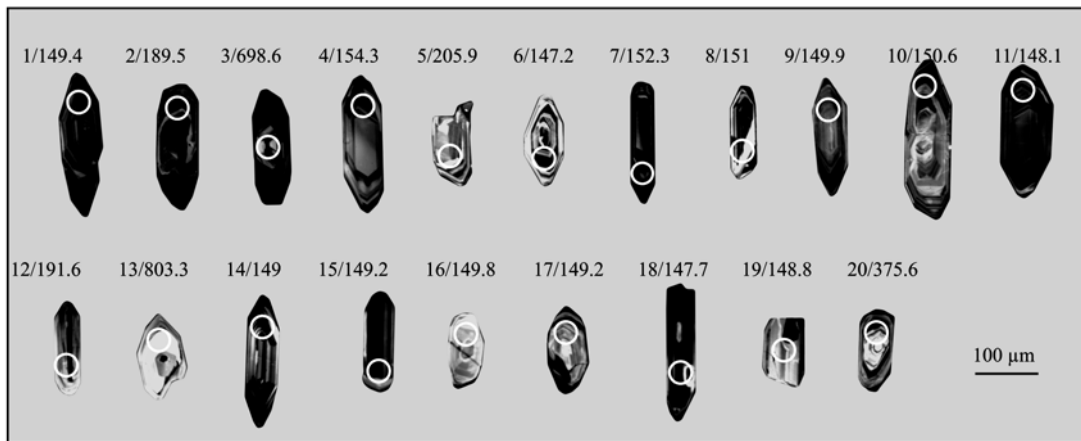


图3 连云港细粒二云母二长花岗岩代表性锆石阴极发光照片

Fig. 3 Representative CL images for zircons of the Lianyunshan fine-grained two-mica monzonitic granites

见加里东期大规模的花岗岩侵入事件, 20号测点 375.6 Ma 可能为混合年龄。其它 16 个测点中有 14 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中分布于 154.3 ~ 147.2 Ma, 2 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中分布于 191.6 ~

189.5 Ma, 投影点均落在谐和线上(图4)。选取年龄较新的 14 个测点计算出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 149.4 ± 1.1 Ma (95% 置信度, $\text{MSWD} = 0.48$) 可代表连云港细粒二云母二长花岗岩的成岩年龄。

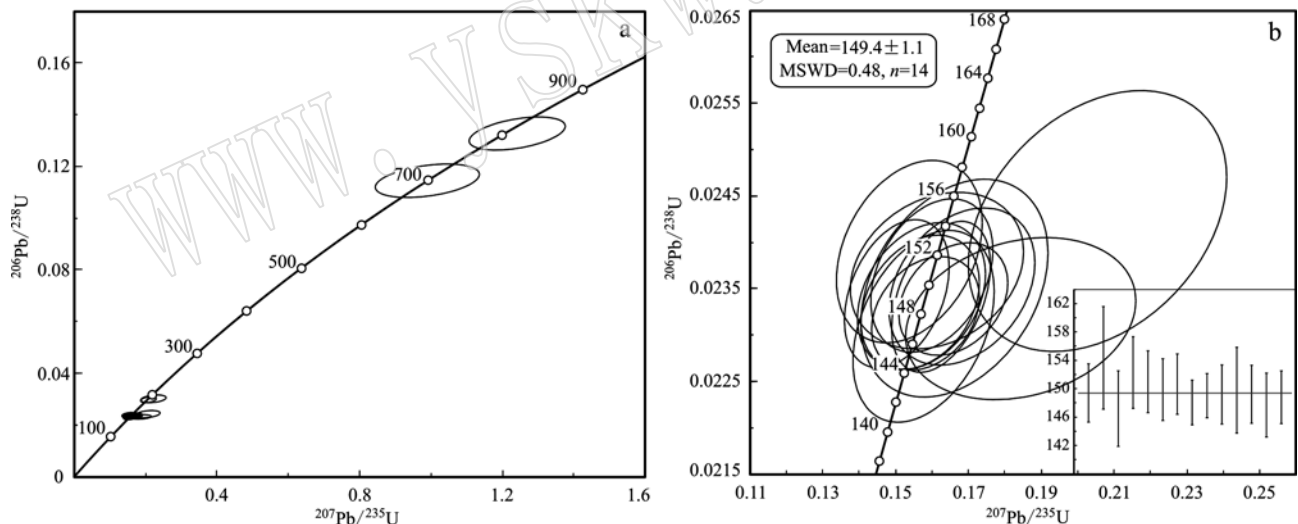


图4 连云港细粒二云母二长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram of zircons from the Lianyunshan fine-grained two-mica monzonitic granites

4.2 岩石地球化学分析结果

连云港花岗岩主量元素和微量元素分析结果见表2。其中细粒二云母二长花岗岩 SiO_2 含量为 72.66% ~ 73.78%, Al_2O_3 含量为 14.51% ~ 14.71%, 铝饱和指数(A/CNK)值为 1.17 ~ 1.23, 属强过铝质(>1.1)。碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)变化范围 7.85% ~ 8.19%, 其中 K_2O 含量 4.47% ~ 5.68%。黑云母花岗闪长岩 SiO_2 含量 68.82% ~ 70.70%, Al_2O_3 含量 14.85% ~ 15.94%, 铝饱和指数

(A/CNK)值 1.06 ~ 1.24。碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 5.14% ~ 6.25%。在岩石分类 TAS 图解(图5a)和岩石系列 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图5b)(Irvine and Baragar, 1971; Peceerillo and Taylor, 1976; Middlemost, 1994)中, 细粒二云母二长花岗岩落在亚碱性花岗岩系列和高钾钙碱性系列, 中细粒黑云母花岗闪长岩落在亚碱性花岗闪长岩系列和钙碱性系列, 两者主量元素地球化学特征差异较大。

细粒二云母二长花岗岩稀土元素总量为155.23

表 2 连云山花岗岩主量元素($w_B/\%$)及微量元素($w_B/10^{-6}$)质量分数组成
Table 2 Major element values and trace element values of the Lianyunshan granite

样号	二云母二长花岗岩					样号	二云母二长花岗岩				
	JC3-1	JC4-1	JC4-3	JC4-2	JC2-1		JC3-1	JC4-1	JC4-3	JC4-2	JC2-1
SiO ₂	72.66	73.78	73.70	68.82	70.70	Hf	3.48	2.74	2.45	5.22	
Al ₂ O ₃	14.51	14.71	14.71	15.94	14.85	Sn	8.44	5.06	4.96	4.88	
Fe ₂ O ₃	0.55	0.12	0.10	0.58	0.28	U	5.00	3.31	3.70	3.12	
FeO	1.49	1.42	1.63	3.01	2.94	Th	18.5	18.1	19.0	16.2	
CaO	0.85	1.20	1.16	2.88	2.90	La	36.0	35.8	37.5	56.8	54.8
MgO	0.38	0.21	0.20	0.93	0.91	Ce	73.4	65.8	73.5	126.0	81.6
K ₂ O	5.68	4.47	4.69	1.45	2.79	Pr	9.41	7.66	7.38	12.40	11.70
Na ₂ O	2.51	3.38	3.29	3.69	3.46	Nd	33.0	26.0	24.7	42.8	40.0
TiO ₂	0.20	0.09	0.08	0.37	0.32	Sm	7.71	4.88	4.52	6.92	6.21
P ₂ O ₅	0.26	0.07	0.08	0.14	0.13	Eu	0.73	0.85	0.82	1.80	1.34
MnO	0.03	0.03	0.03	0.06	0.05	Gd	6.34	3.90	3.84	6.28	4.90
灼失	0.66	0.26	0.18	1.62	0.06	Tb	0.87	0.48	0.46	0.72	0.55
Cu	13.80	6.94	5.51	12.60	9.77	Dy	3.25	1.82	1.78	2.92	2.23
Pb	59.2	63.3	64.3	31.5	73.7	Ho	0.44	0.25	0.25	0.48	0.35
Zn	67.6	28.0	24.7	61.4	58.1	Er	1.08	0.65	0.63	1.30	1.02
Cr	17.5	13.6	9.9	13.6	11.2	Tm	0.13	0.08	0.08	0.18	0.12
Ni	3.77	3.11	3.00	5.08	4.21	Yb	0.89	0.54	0.50	1.14	0.73
Co	2.34	1.39	1.27	5.75	4.15	Lu	0.11	0.08	0.07	0.15	0.09
W	4.42	1.46	2.22	1.49	0.82	Y	11.30	6.44	6.56	12.20	8.57
Mo	0.53	0.37	0.55	0.70		A/CNK	1.23	1.17	1.17	1.24	1.06
Bi	0.70	0.66	0.53	0.21	0.17	ΣREE	184.66	155.23	162.59	272.09	214.21
Sr	56.1	102.0	80.4	352.0	515.0	δEu	0.32	0.60	0.60	0.83	0.74
Ba	261	385	360	824	940	δCe	0.98	0.97	1.08	1.16	0.79
Au	3.69	3.78	3.76	3.89	1.33	Nb/Ta	6.47	7.36	6.54	13.50	
Ag	0.04	0.08	0.07	0.34	0.07	Zr/Hf	26.35	24.20	23.67	31.03	
Nb	13.20	6.33	6.28	10.80		Sm/Nd	0.23	0.19	0.18	0.16	0.16
Ta	2.04	0.86	0.96	0.80		Sr/Y	4.96	15.84	12.26	28.85	60.09
Zr	91.7	66.3	58.0	162.0		(La/Yb) _N	29.01	47.55	53.80	35.74	53.85

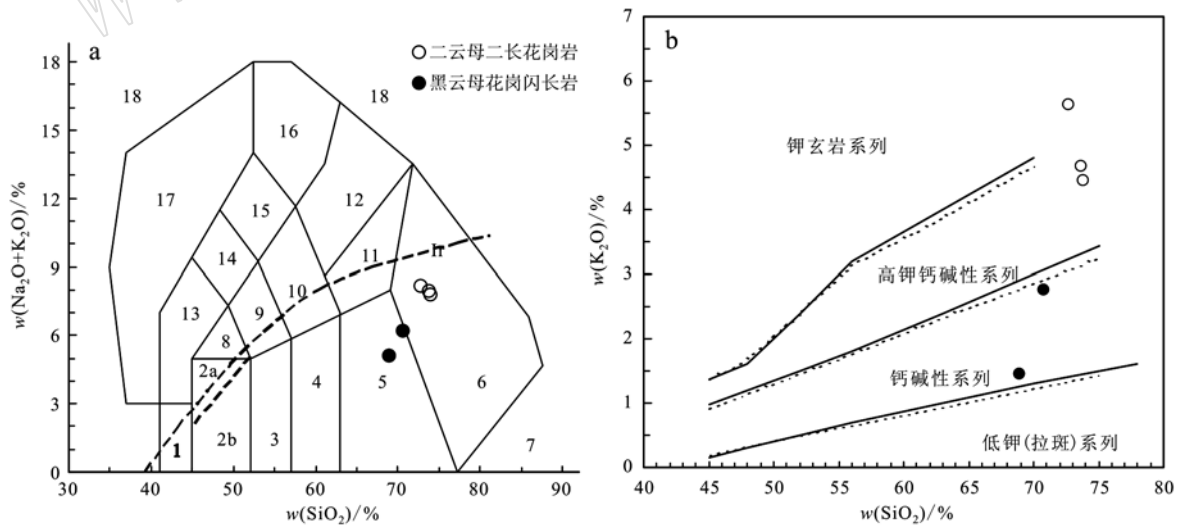


图 5 连云山花岗岩 TAS 岩石分类图解和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 关系图
Fig. 5 TAS diagram and $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram of the Lianyunshan granite

$\times 10^{-6} \sim 184.66 \times 10^{-6}$, 平均 167.49×10^{-6} , δEu 值为 $0.32 \sim 0.60$, δCe 值为 $0.97 \sim 1.08$, Nb/Ta 值为 $6.47 \sim 7.36$, Zr/Hf 值为 $23.67 \sim 26.35$, Sm/Nd 值为 $0.18 \sim 0.23$ 。中细粒黑云母花岗岩闪长岩 $\Sigma \text{REE} =$

$214.21 \times 10^{-6} \sim 272.09 \times 10^{-6}$, δEu 值为 $0.74 \sim 0.83$, δCe 值为 $0.79 \sim 1.16$, Nb/Ta 值为 13.50 , Zr/Hf 值为 31.03 , Sm/Nd 值为 0.16 (表 1)。许德如等 (2017) 测得的连云山细粒-中细粒二云母二长花岗岩 $\sum \text{REE} = 66.09 \times 10^{-6} \sim 122.83 \times 10^{-6}$, δEu 值为 $0.39 \sim 0.88$, δCe 值为 $1.03 \sim 1.08$, Nb/Ta 值为 $9.70 \sim 16.44$, Zr/Hf 值为 $40.82 \sim 49.00$, Sm/Nd 值为 $0.17 \sim 0.27$ 。在稀土元素球粒陨石标准化配分图 (图 6a) 中, 花岗岩样品具右倾斜配分模式, 轻重稀土元素分异强烈, 轻稀土元素富集, 重稀土元素分布平坦, Eu 表现为强烈 (二云母二长花岗岩) 到弱亏损 (黑云母花岗闪长岩), 反映斜长石发生了不同程度分异结晶作用。在微量元素原始地幔标准化蛛网图

(图 6b) 中, 二云母二长花岗岩表现为富集 Th 、 U 、 K 、 Pb 等元素, 亏损 Ba 、 Sr 、 Nb 、 Ta 、 Zr 、 Ti 等元素, Sr 和 Ti 元素亏损反映了斜长石和钛铁矿的分离结晶; 黑云母花岗闪长岩表现为富集 Th 、 U 、 Pb 等元素, 亏损 Nb 、 Ta 、 Zr 、 Ti 等元素, 与二云母二长花岗岩在大离子亲石元素 K 、 Ba 、 Sr 上表现了一定差异。

4.3 Hf 同位素分析

对测年样品锆石 15 个有效测点 (包含 3 号继承锆石核) 进行了原位 Hf 同位素分析。除继承锆石用测点的年龄计算外, 其余锆石 Hf 同位素计算所用的年龄为该样品的加权平均年龄 149.4 Ma , 分析结果见表 3。14 个燕山期花岗岩锆石的 Hf 同位素组成相对集中, 初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较一致, 分布在

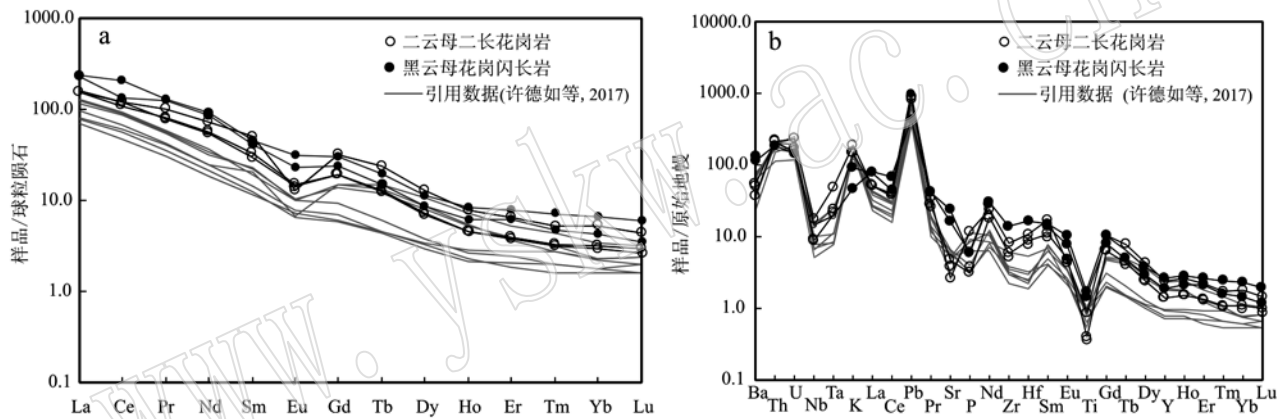


图 6 连云山花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of the Lianyunshan granite

表 3 连云山细粒二云母二长花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 LA-MC-ICPMS Lu-Hf isotope data of zircons from the Lianyunshan fine-grained two-mica monzonitic granite

分析点	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t/Ma	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	$t_{1\text{DM}}/\text{Ma}$	$t_{2\text{DM}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	0.282 450	0.000 015	0.010 177	0.000 148	0.000 388	0.000 005	149.4	-8.2	1 117	1 714	-0.99
3	0.282 412	0.000 037	0.041 971	0.000 228	0.001 677	0.000 008	698.6	1.9	1 210	1 498	-0.95
4	0.282 408	0.000 024	0.032 823	0.000 230	0.001 284	0.000 008	149.4	-9.6	1 203	1 810	-0.96
6	0.282 442	0.000 020	0.015 620	0.000 088	0.000 574	0.000 003	149.4	-8.5	1 133	1 734	-0.98
7	0.282 438	0.000 017	0.002 351	0.000 162	0.000 079	0.000 005	149.4	-8.5	1 124	1 736	-0.99
8	0.282 433	0.000 021	0.012 024	0.000 142	0.000 445	0.000 005	149.4	-8.7	1 142	1 751	-0.99
9	0.282 368	0.000 019	0.008 492	0.000 053	0.000 327	0.000 002	149.4	-11.0	1 228	1 897	-0.99
10	0.282 410	0.000 019	0.014 594	0.000 127	0.000 575	0.000 005	149.4	-9.6	1 177	1 803	-0.98
11	0.282 440	0.000 018	0.016 337	0.000 138	0.000 643	0.000 005	149.4	-8.6	1 138	1 738	-0.98
14	0.282 461	0.000 018	0.010 952	0.000 167	0.000 411	0.000 006	149.4	-7.8	1 102	1 690	-0.99
15	0.282 389	0.000 016	0.012 769	0.000 348	0.000 467	0.000 012	149.4	-10.3	1 204	1 852	-0.99
16	0.282 459	0.000 028	0.006 629	0.000 187	0.000 263	0.000 008	149.4	-7.8	1 101	1 694	-0.99
17	0.282 370	0.000 020	0.011 596	0.000 067	0.000 435	0.000 002	149.4	-11.0	1 229	1 893	-0.99
18	0.282 452	0.000 022	0.014 351	0.000 291	0.000 545	0.000 011	149.4	-8.1	1 118	1 711	-0.98
19	0.282 314	0.000 047	0.010 200	0.000 207	0.000 388	0.000 007	149.4	-13.0	1 304	2 018	-0.99

0.282 314 ~ 0.282 461 之间, 平均为 0.284 17, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中分布在 -13 ~ -7.8 之间, 平均值为 -9.3, 二阶段模式年龄($t_{2\text{DM}}$) 在 2 018 ~ 1 690 Ma 之间, 平均值为 1 789 Ma。3 号继承锆核初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 412, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 1.9, 一阶段模式年龄($t_{1\text{DM}}$) 为 1 210 Ma, 二阶段模式年龄($t_{2\text{DM}}$) 为 1 498 Ma。

5 讨论

5.1 成岩年龄

湖南地质研究所(1995)测得的连云山岩体黑云母二长花岗岩中黑云母 K-Ar 年龄为 160 Ma, 黑云母花岗闪长岩独居石 U-Th-Pb 同位素年龄为 164 Ma, 但由于早年实验条件限制, 年龄误差较大。1:5 万洋春-官渡幅区域地质调查(彭和求等, 2004)^①依据早年的同位素年龄值、岩石学特征、岩浆演化规律及接触关系将连云山岩浆活动初步划分成 3 次岩浆侵入活动, 岩性特征上有明显的不同, 从早到晚依次为细-中细粒黑云母花岗闪长岩、中粒斑状黑云母二长花岗岩和细-中细粒二云母二长花岗岩。

锆石中 Pb 的扩散封闭温度高达 900℃(Cherniak and Watson, 2000), 是目前确定高级变质作用峰期年龄和岩浆岩结晶年龄的理想对象, 锆石 U-Pb 年龄测定为限定岩石成岩年龄范围提供了重要的证据。笔者收集的连云山地区混合岩副片麻岩、冷家溪群和连云山岩体最新的锆石 U-Pb 年龄数据(表 4)中, Wang 等(2016)测得的连云山岩体中粒二云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 152.9 ± 2.5 Ma, 残斑状黑云母二长花岗岩年龄为 150.2 ± 2.5 Ma, 中细粒二云母正长花岗岩为 140.5 ± 1.1 Ma, 细粒白云母二长花岗岩为 139.6 ± 1.0 Ma; 许德如等(2017)测得的连云山岩体中细粒二云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 150 ~ 141 Ma, 加权平均年龄 145 Ma; Deng 等(2017)测得的连云山岩体锆石 U-Pb 年龄为 142 ± 2 Ma。本文得到连云山岩体细粒二云母二长花岗岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为 149.4 ± 1.1 Ma, 与 Wang 等(2016)和许德如等(2017)测得的二云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致, 确定了细粒二云母二长花岗岩和中细粒二云母二长花岗岩为同时期侵入, 二云母二长花岗岩的形成时代为晚侏罗世。

表 4 连云山地区岩体锆石 U-Pb 年龄信息表
Table 4 Data of zircons form the Lianyunshan rock bodies

样品编号	主要岩性	形成年龄/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值	模式年龄/Ga	测试方法	成岩年龄数据来源
1379	片岩残留体	峰值 842	-37.3 ~ +13.6	$t_{1\text{DM}}$ 5 组: 1.4~0.9, 2.0~1.7, 2.4~2.3, 3.1~2.5, 3.8~3.6	锆石 LA-ICP-MS	Wang <i>et al.</i> , 2016
1380	冷家				锆石 LA-ICP-MS	
1392	溪群				锆石 LA-ICP-MS	
1377	中粒二云母二长花岗岩	152.9 ± 2.5	-17.0 ~ -2.6	$t_{2\text{DM}}$: 2.72~1.36, 峰值 1.8~1.4 Ga	锆石 LA-ICP-MS	Wang <i>et al.</i> , 2016
1386	残斑状黑云母二长花岗岩	150.2 ± 2.5			锆石 LA-ICP-MS	
1387	中细粒二云母正长花岗岩	140.5 ± 1.1			锆石 LA-ICP-MS	
1389	细粒白云母二长花岗岩	139.6 ± 1.0	-10.9 ~ -6.4	$t_{2\text{DM}}$: 1.9~1.6 Ga	锆石 LA-ICP-MS	Wang <i>et al.</i> , 2016
LLYS02	连云山岩体	142±2			锆石 LA-ICP-MS	
LLYS01	连云山花岗岩	145±1			锆石 LA-ICP-MS	
JC4-1	中细粒二云母二长花岗岩	149.4 ± 1.1	-13 ~ -7.8	$t_{2\text{DM}}$: 2.0~1.6 Ga	锆石 LA-ICP-MS	本文

综合近年来锆石 U-Pb 年龄数据, 黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 150.2 Ma, 二云母二长花岗岩为 152.9 ~ 142 Ma, 二云母正长花岗岩为 140.5 Ma, 白云母二长花岗岩为 139.6 Ma, 这些年龄之间没有明显的间断, 表明黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花

岗岩、二云母正长花岗岩、二云母二长花岗岩和白云母二长花岗岩可能是同期岩浆侵入活动产物, 经历了岩浆分异作用和同化混染作用, 连云山岩体的成岩年龄为晚侏罗世。

本次工作中还发现有新元古代继承锆石核的存

① 彭和求, 陈 俊, 何江南, 等. 2004. 1:5 万洋春-官渡幅区域地质调查报告.

在,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 803.3 和 698.6 Ma,这与前人研究结果一致,说明湖南地区的中酸性岩体中存在着新太古代至新元古代继承锆石核(付建明等, 2004; 马铁球等, 2005)。

5.2 物质来源

连云山二云母二长花岗岩富含白云母,而白云母的出现通常被认定为 S 型花岗岩的矿物学依据。二云母二长花岗岩具有高 SiO_2 含量,强过铝质 (A/CNK 值 ≥ 1.1),富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.85\% \sim 8.19\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, 显示出强过铝质高钾钙碱性花岗岩特征,与含白云母过铝质花岗岩类 (MPG) 类似。黑云母花岗闪长岩具有高 SiO_2 含量,过铝质 ($A/\text{CNK} = 1.06 \sim 1.24$),与富黑云母过铝质花岗岩类 (CPG) 类似,源区具有陆壳成分特征 (White and Chappell, 1983; Le Fort *et al.*, 1987)。二云母二长花岗岩和黑云母花岗闪长岩都亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 等高场强元素,原始地幔形成陆壳时 Nb、Ta 元素优先

残留在地幔中,陆壳中含量相对较低, Nb、Ta 元素亏损表明源区可能为地壳物质; Ti 元素不易进入熔体而残留在源区, Ti 元素极度贫化往往暗示岩浆来自于地壳。

锆石原位 Hf 同位素分析是研究地壳演化和示踪岩浆源区的重要手段 (吴福元等, 2007)。连云山细粒二云母二长花岗岩样品燕山期锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,314 \sim 0.282\,461$, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-13 \sim -7.8$ (图 7a), Hf 同位素二阶段模式年龄在 $2\,018 \sim 1\,690$ Ma 之间,在 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ 图 (图 7b) 上,锆石测点数据落在下地壳演化线附近,表明二云母二长花岗岩主要物质来源为中元古代—古元古代的地壳岩石部分熔融。Wang 等 (2016) 测得的连云山花岗岩 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值 $-17.0 \sim -2.6$ 和 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值 $-10.9 \sim -6.4$, 许德如等 (2017) 测得的连云山二云母二长花岗岩全岩 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-13.65 \sim -13.36$, 也暗示了花岗岩的源区为地壳岩石。

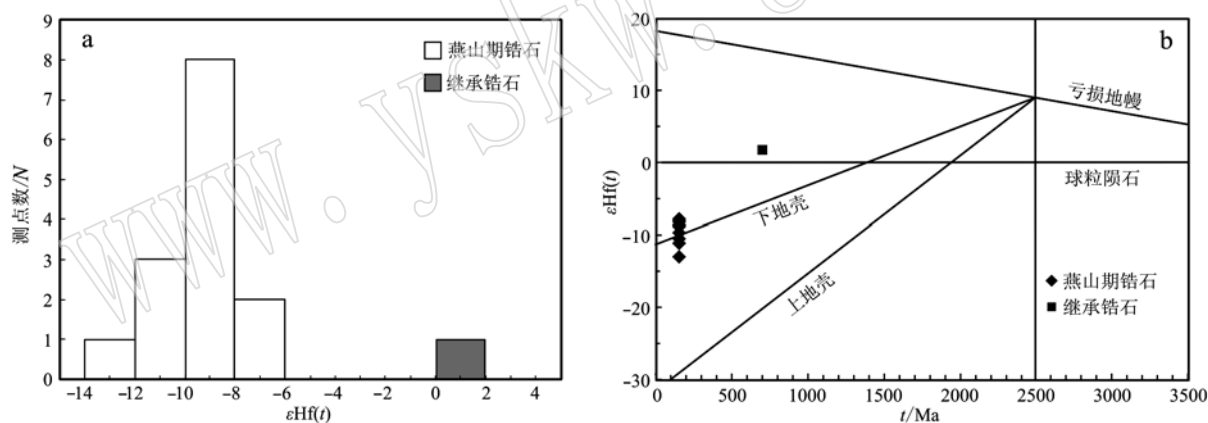


图 7 连云山细粒二云母二长花岗岩锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 直方图和 Hf 同位素演化图解

Fig. 7 Histograms of $\varepsilon\text{Hf}(t)$ and Hf isotopic diagram of zircons from the Lianyunshan fine-grained two-mica monzonitic granite

根据 Sr 和 Yb 元素含量能够大致判断岩浆形成的压力。张旗等 (2005, 2006) 以 Sr 含量 400×10^{-6} 和 Yb 含量 2×10^{-6} 为标准,划分出了高 Sr 低 Yb、低 Sr 低 Yb、低 Sr 高 Yb 和高 Sr 高 Yb 共 4 种类型花岗岩。连云山二云母二长花岗岩 Sr 含量为 $56.1 \times 10^{-6} \sim 102.0 \times 10^{-6}$, Yb 含量为 $0.50 \times 10^{-6} \sim 0.89 \times 10^{-6}$,与低 Sr 低 Yb 花岗岩类似,指示其形成于中等压力环境;黑云母花岗闪长岩 Sr 含量为 $352 \times 10^{-6} \sim 515 \times 10^{-6}$, Yb 含量为 $0.73 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-6}$,与高 Sr 低 Yb 花岗岩类似,指示其形成于高-中等压力环境。在地壳熔融过程中,由于压力与斜长石的稳定性呈反比关系 (Zeng *et al.*, 2011), ($\text{Na}_2\text{O} +$

CaO)/ K_2O 值反映了熔体压力的变化,说明黑云母花岗闪长岩熔体压力大于二云母二长花岗岩。

黑云母花岗闪长岩 Na_2O 、 CaO 含量相对高, K_2O 含量相对低,富 Na、Ba、Sr 和 LREE 含量较高, Y 和 Yb 含量较低,高 Sr/Y 和 La/Yb 值,代表了较原始的花岗质岩浆,与曾令森等 (2017) 研究的高 Sr/Y 和 La/Yb 花岗岩类似,花岗岩源区为变基性岩的部分熔融,暗示了具增厚下地壳的构造背景。二云母二长花岗岩 K_2O 含量相对高, CaO 含量相对低,富 K、Ba、Sr 含量相对低, Y 和 Yb 含量较低, Sr/Y 值低,具较显著的负 Eu 异常,与黑云母花岗闪长岩地球化学特征差异明显,花岗岩源区主要为长英质和泥质变

质岩的部分熔融, 熔体压力相对低, 熔融环境发生了减压。

连云山杂岩源岩成分复杂, 有砂、泥碎屑沉积岩和火山碎屑沉积岩等, 经历了区域角闪岩相变质改造, 早年认为属于古元古代结晶基底岩系, Wang 等 (2016) 测得的片岩残留体混合岩中副片麻岩的锆石 U-Pb 年龄在 842 Ma 左右, 片岩残留体和冷家溪群 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-37.3 \sim +13.6$, t_{DM} 有 5 组峰值年龄, 说明连云山杂岩形成时代可能为新元古代, 与区内冷家溪群浅变质岩年龄相当。

5.3 构造背景

钦杭结合带是扬子和华夏古板块碰撞拼接带, 也是一条巨型的构造岩浆活动带, 沿着该带产出了有新元古代、早古生代、海西-印支期和燕山期花岗岩, 学者们普遍认为其完成拼接是在新元古代, 中生代时期发生了构造活化, 伴随着大规模的成岩成矿事件 (毛景文等, 2011; 徐德明等, 2012, 2015)。华南中生代爆发大规模的岩浆活动和成矿作用事件, 其构造动力学背景一直是研究的热点, 比较一致的观点认为华南构造体制由特提斯体制转变为太平洋体制, 太平洋板块的运动控制了区域构造岩浆演化。其中舒良树等 (2002) 认为古太平洋板块低角度、快速率的俯冲, 使大洋板块下插到很远的大陆之下, 从而产生十分宽阔的火山岩带; 毛景文等 (2011) 认为古太平洋板块低的俯冲, 使中国东部大陆演化成为活动大陆边缘, 持续俯冲导致大陆地壳不断加厚, 弧后出现了一系列 NE 向岩石圈伸展带和深大断裂; 许

德如等 (2017) 用古太平洋板块平俯冲模式解释中生代构造演化, 认为平俯冲的太平洋板块在中侏罗世一早白垩世崩塌、破裂, 使得加厚的下地壳熔融。

华南构造体制转变为太平洋体制后, 随着古太平洋板块向欧亚大陆持续低角度俯冲, 大洋板块下插到很远的大陆板块之下, 下插的大洋板块打破了地幔平衡, 促使地幔上隆, 并使得位于其上的地壳受到强烈抬升。古太平洋板块的持续俯冲和深部构造-岩石圈地幔作用的联合制约形成了区域性的北东向构造和断陷盆地, 原先不活动的断裂也开始活动, 地幔上隆还加速了下地壳的熔融, 熔融形成的岩浆沿着活动的深大断裂发生大规模的岩浆侵位事件, 钦杭古板块结合带由于构造位置特殊性成为了这次大规模岩浆侵位事件的集中区域 (徐德明等, 2012), 形成的代表性岩体有连云山岩体、幕府山岩体 (170 ~ 131 Ma)、蕉溪岭岩体 (162 ~ 158 Ma)、七宝山岩体 (154 Ma) 和金井岩体 (158 Ma) 等 (湖南地质研究所, 1995; 胡俊良等, 2015)。

连云山二云母二长花岗岩 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解显示其岩浆来源于下地壳的熔融, 结合地球化学特征表明, 黑云母花岗闪长岩是变基性岩部分熔融的产物, 二云母二长花岗岩主要为长英质和泥质变质岩部分熔融的产物, 区内的构造演化和岩浆活动受太平洋板块的运动制约。在 Nb-Y 和 Ta-Yb 图解 (图 8) 上, 连云山二云母二长花岗岩落在了同碰撞型和火山弧型花岗岩范围内, 图中同碰撞型花岗岩包括了同碰撞和后碰撞花岗岩。连云山岩体为一套强过铝

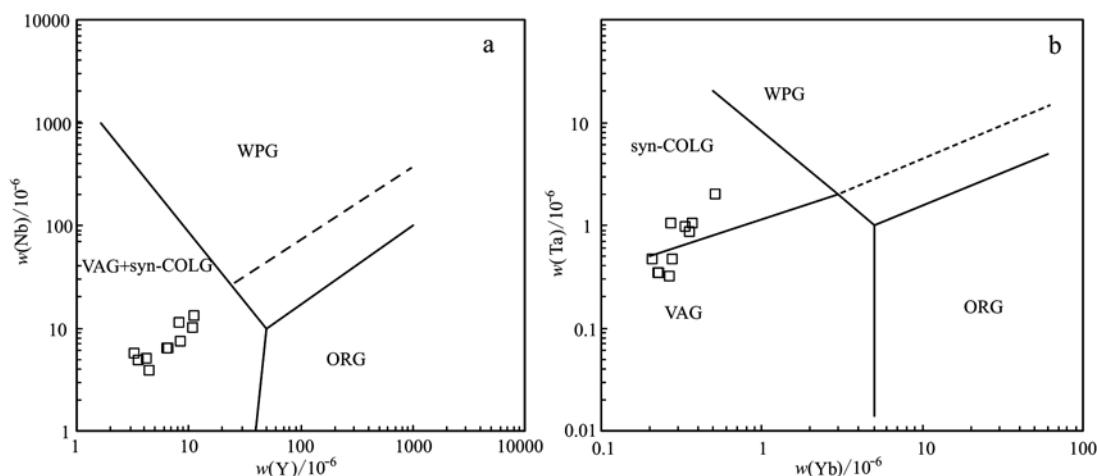


图 8 连云山二云母二长花岗岩构造环境判别图解 (据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 8 Discrimination diagrams of tectonic settings for the Lianyungshan two-mica monzonitic granites (after Pearce *et al.*, 1984)

Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩

Syn-COLG—syn-collisional granite; VAG—volcanic arc granite; ORG—ridge granite; WPG—intraplate granite

质高钾钙碱性-过铝质钙碱性系列花岗岩,其侵入定位受长平大断裂剪切活动控制,与后碰撞花岗岩特征类似,指示了一种持续或间歇性伸展构造环境。

6 结论

(1) 通过对 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得了井冲钴铜矿区连云山岩体细粒二云母二长花岗岩的加权平均年龄为 149.4 ± 1.1 Ma,形成时代为晚侏罗世,与出露的黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩和白云母二长花岗岩可能是同期岩浆侵入产物。

(2) 通过岩石地球化学研究,确定连云山二云母二长花岗岩为一套强过铝质高钾钙碱性系列花岗岩,高硅(SiO_2)富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$),富集 Th、U、K、Pb 等元素,亏损 Ba、Sr、Nb、Ta、Zr、Ti 等元素;黑云母花岗闪长岩为一套过铝质钙碱性系列花岗岩,高硅(SiO_2)富钠(Na_2O),富集 Th、U、Pb 等元素,亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 等元素。两种岩石球粒陨石标准化 REE 配分模式皆为右倾斜配分模式,轻重稀土元素分异强烈,轻稀土元素富集,重稀土元素平坦分布, Eu 表现为强烈到弱亏损。

(3) Hf 同位素分析结果显示,二云母二长花岗岩中燕山期锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,314 \sim 0.282\,461$, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值集中分布在 $-13 \sim -7.8$ 之间, Hf 同位素二阶段模式年龄集中在 $2\,018 \sim 1\,690$ Ma 之间。连云山花岗岩成因是下地壳岩石部分熔融,黑云母花岗闪长岩为变基性岩部分熔融的产物,二云母二长花岗岩为长英质和泥质变质岩部分熔融的产物,太平洋板块的运动控制了区内构造演化和岩浆活动。

References

- Cherniak D J and Watson E B. 2000. Pb diffusion in zircon[J]. *Chemical Geology*, 172: 5 ~ 24.
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, *et al.* 2004a. Zircon SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, South China, and its significance[J]. *Geology in China*, 33(1): 96 ~ 100(in Chinese with English abstract).
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, *et al.* 2004b. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Jiuyishan composite granite in Hunan and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(4): 370 ~ 378(in Chinese with English abstract).
- Hu Junliang, Xu Dengming, Zhang Kun, *et al.* 2015. Zircon U-Pb dating, Hf isotope of magmatic rocks from Qibaoshan Cu polymetallic deposit, Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 236 ~ 245(in Chinese with English abstract).
- Hunan Institute of Geology. 1995. Division of granite unit super unit in Hunan province and its metallogenic specialization[J]. *Hunan Geology*, 8: 1 ~ 59(in Chinese with English abstract).
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 532 ~ 548.
- Wang J Q, Shu L S and Santosh M. 2016. Petrogenesis and tectonic evolution of Lianyunshan complex, South China: Insights on Neoproterozoic and late Mesozoic tectonic evolution of the central Jiangnan Orogen[J]. *Gondwana Research*, (39): 114 ~ 130.
- Le Fort P, Cuney M, Deniel C, *et al.* 1987. Crustal genetation of the Himalayan leucogranites[J]. *Tectonophysics*, 134: 39 ~ 57.
- Zeng L S, Gao L E, Xie K J, *et al.* 2011. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting thickened lower continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 303: 251 ~ 266.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1&2): 537 ~ 571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1 ~ 2): 34 ~ 43.
- Lu Yuanfa. 2004. GeoKit-A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 33(5): 459 ~ 464(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 39.
- Ma Tieqiu, Bo Daoyuan, Kuang Jun, *et al.* 2005. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, southeastern Hunan, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(5): 415 ~ 419(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, *et al.* 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636 ~ 658(in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Sci. Rev.*, 37: 15 ~ 224.
- Pearce J A, Harris N B and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956 ~ 983.
- Peeceerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63 ~ 81.
- Shu Liangshu and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic Tectonism of Southeast China[J]. *Geological Review*, 48(3): 249 ~ 260(in Chinese

- with English abstract).
- Deng T, Xu D R, Chi G X, *et al.* 2017. Geology, geochronology, geochemistry and ore genesis of the Wangu gold deposit in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, (88): 619 ~ 637.
- White A J R and Chappell B W. 1983. Granitoid types and their distribution in the lachlan fold belt, south-eastern Australia[J]. *Geological Society of American Membership*, 159: 21 ~ 34.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 ~ 220(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Zircon genetic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589 ~ 1 604(in Chinese with English abstract).
- Xu Deming, Lin Zhiyong, Long Wenguo, *et al.* 2012. Research history and current situation of Qinzhou-Hangzhou Metallogenic Belt, South China[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(4): 277 ~ 289(in Chinese with English abstract).
- Xu Deming, Lin Zhiyong, Luo Xuequan, *et al.* 2015. Metallogenic series of major metallic deposits in the Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 7 ~ 24(in Chinese with English abstract).
- Xu Deru, Deng Teng, Dong Guojun, *et al.* 2017. Zircon U-Pb geochronological and geochemical characteristics of the Lianyungshan two-mica monzogranites in northeastern Hunan Province: Implications for petrogenesis and tectonic setting associated with poly-metallic mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(2): 104 ~ 122(in Chinese with English abstract).
- Xu Ping, Wu Fuyuan, Xie Liewen, *et al.* 2004. Hf isotopes of standard zircon dating from U-Pb isotopes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49: 1 403 ~ 1 410(in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui and Mei Yongwen. 1997. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou-Hangzhou paleoplate juncture[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 52 ~ 59(in Chinese with English abstract).
- Yi Zushui, Luo Xiaoya, Zhou Donghong, *et al.* 2010. Geological characteristics and genesis of Jinchong Co-Cu polymetal deposit, Liuyang, Hunan Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 3: 12 ~ 18(in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, *et al.* 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS[J]. *Chem. Geol.*, 247: 100 ~ 118.
- Zhang Qi, Li Chengdong, Wang Yan, *et al.* 2005. Mesozoic high-Sr and low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China: Comparison and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1 527 ~ 1 537(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Li Chengdong, Wang Yan, *et al.* 2006. A granite classification based on pressures[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1 274 ~ 1 278(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 2004a. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. *中国地质*, 33(1): 96 ~ 100.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 2004b. 湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 28(4): 370 ~ 378.
- 胡俊良, 徐德明, 张 鲲. 2015. 湖南七宝山矿床石英斑岩锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素地球化学[J]. *华南地质与矿产*, (3): 236 ~ 245.
- 湖南地质研究所. 1995. 湖南省花岗岩单元-超单元划分及其成矿专属性[J]. *湖南地质*, 8: 1 ~ 59.
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 33(5): 459 ~ 464.
- 马铁球, 柏道远, 邝 军, 等. 2005. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 24(5): 415 ~ 419.
- 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[J]. *地质学报*, 85(5): 636 ~ 658.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用[J]. *地质论评*, 48(3): 249 ~ 260.
- 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[J]. *岩石学报*, 23(2): 185 ~ 220.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 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*, 49(16): 1 589 ~ 1 604.
- 徐德明, 蔺志永, 龙文国, 等. 2012. 钦杭成矿带的研究历史和现状[J]. *华南地质与矿产*, 28(4): 277 ~ 289.
- 徐德明, 蔺志永, 骆学全, 等. 2015. 钦-杭成矿带主要金属矿床成矿系列[J]. *地学前缘*, 22(2): 7 ~ 24.
- 徐 平, 吴福元, 谢烈文, 等. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. *科学通报*, 49: 1 403 ~ 1 410.
- 许德如, 邓 腾, 董国军, 等. 2017. 湘东北连云山二云母二长花岗岩的年代学和地球化学特征: 对岩浆成因和成矿地球动力学背景的启示[J]. *地学前缘*, 24(2): 104 ~ 122.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. *华南地质与矿产*, (3): 52 ~ 59.
- 易祖水, 罗小亚, 周东红, 等. 2010. 浏阳市井冲钴铜多金属矿床地质特征及成因浅析[J]. *华南地质与矿产*, 3: 12 ~ 18.
- 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 旗, 李承东, 王 焰, 等. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义[J]. *岩石学报*, 21(6): 1 527 ~ 1 537.
- 张 旗, 王 焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩按照压力的分类[J]. *地质通报*, 25(11): 1 274 ~ 1 278.