

doi: 10.12029/gc20210417

蔡富成, 秦锦华, 覃金宁, 姜必广, 朱成生. 2021. 湖南川口岩体型钨矿赋矿花岗岩地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 中国地质, 48(4): 1212-1224.

Cai Fucheng, Qin Jinhua, Qin Jinning, Jiang Biguang, Zhu Chengsheng. 2021. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of ore-bearing granite of Chuankou intrusion-related tungsten deposit, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 48(4): 1212-1224(in Chinese with English abstract).

湖南川口岩体型钨矿赋矿花岗岩地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

蔡富成¹, 秦锦华², 覃金宁¹, 姜必广¹, 朱成生¹

(1. 湖南省核工业地质局三〇六大队, 湖南 衡阳 421008; 2. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:川口矿田钨矿床产于湖南衡阳川口岩体的外接触带及岩体内部, 矿床类型主要有岩浆热液石英细脉带型和石英大脉型。近年川口矿田取得了重大找矿突破, 并发现了新类型的岩体型钨矿。本文对川口岩体型钨矿床的黑云母二长花岗岩及赋矿的白云母二长花岗岩分别进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学特征研究, 获得川口岩体的成岩年龄为(223.1±0.78)Ma, MSWD=0.98, n=24, 岩体型钨矿成矿年龄为(224.6±1.31)Ma, MSWD=0.33, n=9, 为印支期成岩成矿。川口花岗岩具有高 SiO₂, 富 K₂O+Na₂O, 低 CaO、MgO 的特点, 属于过铝质高钾钙碱性系列 S 型花岗岩, 形成于碰撞环境下弱挤压构造体制。川口岩体稀土总量(ΣREE)整体较低, 轻稀土相对较富集, 具有强烈的负 Eu 异常, 富集大离子亲石元素 Ba、K 和高场强元素 Ta, 而亏损大离子亲石元素 Sr 和相容元素 P、Ti 等, 表明该岩体各阶段花岗岩来自同一岩浆源, 且经历了高度演化。赋矿花岗岩更低的 δEu 值及 (La/Yb)_n 值, 表明其结晶分异程度更高。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 岩体型钨矿; 地球化学; 川口岩体; 地质调查工程; 湖南

中图分类号: P588.12; P597⁺.3; P595; P618.67 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)04-1212-13

Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of ore-bearing granite of Chuankou intrusion-related tungsten deposit, Hunan Province

CAI Fucheng¹, QIN Jinhua², QIN Jinning¹, JIANG Biguang¹, ZHU Chengsheng¹

(1. Geological Bureau of Hunan Province Nuclear Industry Brigade 306, Hengyang 421008, Hunan, China;

2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The tungsten deposits in the Chuankou orefield occur in the outer contact zone and the inner part of the Chuankou pluton. The deposit types are mainly quartz-veinlet belt type and quartz-big vein type of magmatic-hydrothermal origin. In recent years, a

收稿日期: 2020-02-29; 改回日期: 2020-09-09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160346、DD20190379)。

作者简介: 蔡富成, 男, 1987 年生, 工程师, 主要从事矿产勘探工作; E-mail: Caifucheng@163.com。

通讯作者: 秦锦华, 男, 1992 年生, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: qjh1992@qq.com。

breakthrough in prospecting has been made in the Chuankou orefield, and a new type of intrusion-related tungsten deposits has been found. In this paper, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and rock geochemical characteristics of biotite adamellite and ore-hosting rock muscovite monzogranite are studied. The diagenetic age of the Chuankou pluton is (223.1 ± 0.78) Ma, MSWD=0.98, $n=24$, and the ore-forming age of the intrusion-related tungsten deposit is (224.6 ± 1.31) Ma, MSWD = 0.33, $n=9$, all of which are in Indosinian period. The Chuankou granite is characterized by high SiO_2 and $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, low CaO and MgO. It belongs to the peraluminous high-K calc-alkaline series S-type granites, which was formed under the weak compression tectonic system in the collision environment. The Chuankou pluton is characterized by low total REE (Σ REE), relatively rich LREE, strong negative Eu anomaly, enrichment of large ion lithophile elements Ba, K, and high field strength element Ta, and depletion of large ion lithophile elements Sr and compatible elements P, Ti, which indicates that the granites of each stage of the granites came from the same magma source and experienced a high degree of evolution. Compared with other granites, the ore-bearing granite (muscovite monzogranite) with lower δEu value and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ value has a higher crystallization differentiation degree.

Key words: zircon U-Pb age, rock type tungsten ore; geochemistry, Chuankou pluton; geological survey engineering; Hunan Province

About the first author: CAI Fucheng, male, born in 1987, engineer, mainly engaged in mineral exploration; E-mail: Caifucheng@163.com.

About the corresponding author: QIN Jinhua, male, born in 1992, doctor, major in mineralogy, petrology and ore deposit; E-mail: qjh1992@qq.com.

Funder support: Supported by the program of China Geological Survey(No. DD20160346, No. DD20190379).

1 引言

川口钨矿田位于湖南衡阳盆地东缘,主要有杨林坳(超大型)、窑木岭(大型)、三角潭(大型)等钨矿床,前人对其花岗岩的地球化学特征、成因与构造环境(柏道远等, 2007a; 王宾海等, 2016)、矿床地质特征(郑平, 2008; 柳智, 2012)、矿床形成年代(彭能立等, 2017)、矿床成因、成矿模式(郑平等, 2007; 王银茹, 2012)等方面做了一些研究,但多局限于岩浆热液石英细脉带型、石英大脉型钨矿。

近年来,随着川口边深部找矿工作持续推进,相继发现了毛湾、白水、塘江沅等大中型规模的岩体型钨矿,为该区找矿开拓了新方向。由于该类型钨矿为本区新发现的钨矿化类型,研究工作展开有限,岩体与赋矿花岗岩的关系不明确,赋矿花岗岩是否即为成矿岩体均不明确。本文通过长期详实的野外地质工作、岩石学、岩石地球化学及同位素年代研究,深入探讨岩体型钨矿的成岩成矿时代及赋矿花岗岩的地球化学特征,以期川口地区构造演化和钨成矿作用提供新依据,为找矿勘查提供线索。

2 地质背景及岩石学特征

川口钨矿位于扬子准地台南缘,常德—宁乡—汝城北西向大断裂与攸县—宁远北东向大断裂锐

角夹持区。衡阳盆地与茶陵盆地之间的川口近南北向隆起转折部位之中段(图1a)。

川口岩体群由20余处小岩体组成(图1b),侵入于中泥盆统杨林坳组(D_{2y})及新元古界青白口系冷家溪群(QbL)地层中,出露面积约12 km²,接触带围岩有明显的热接触变质作用。根据野外实地调研,川口岩体主要岩性有黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩及白云母二长花岗岩。

黑云母二长花岗岩:细—中粒花岗结构,块状构造(图2a),石英(30%~32%)呈他形粒状;斜长石(37%~42%)半自形板柱状;钾长石(20%~25%)包括正长石、条纹长石,少量边部具不均匀钠长石化;黑云母(4%~6%)呈鳞片状,析出磁铁矿,副矿物常包裹于其中。

二云母二长花岗岩:灰—灰白色,细粒花岗结构,块状构造(图2b),石英(26%~28%)他形粒状;斜长石(28%~33%)呈半自形板柱状,部分被石英沿边部、内部充填交代呈不规则状;钾长石(35%~40%)包括正长石、微斜长石、微纹长石、文象长石;黑云母(1%~3%)鳞片状,轻微绿泥石化、白云母化、析出榍石;白云母(2%~3%)呈鳞片状,星散分布,可见副矿物石榴子石。

白云母二长花岗岩:中—细粒花岗结构,块状构造(图2c、d),石英(约31%)多为呈缝合线状接触

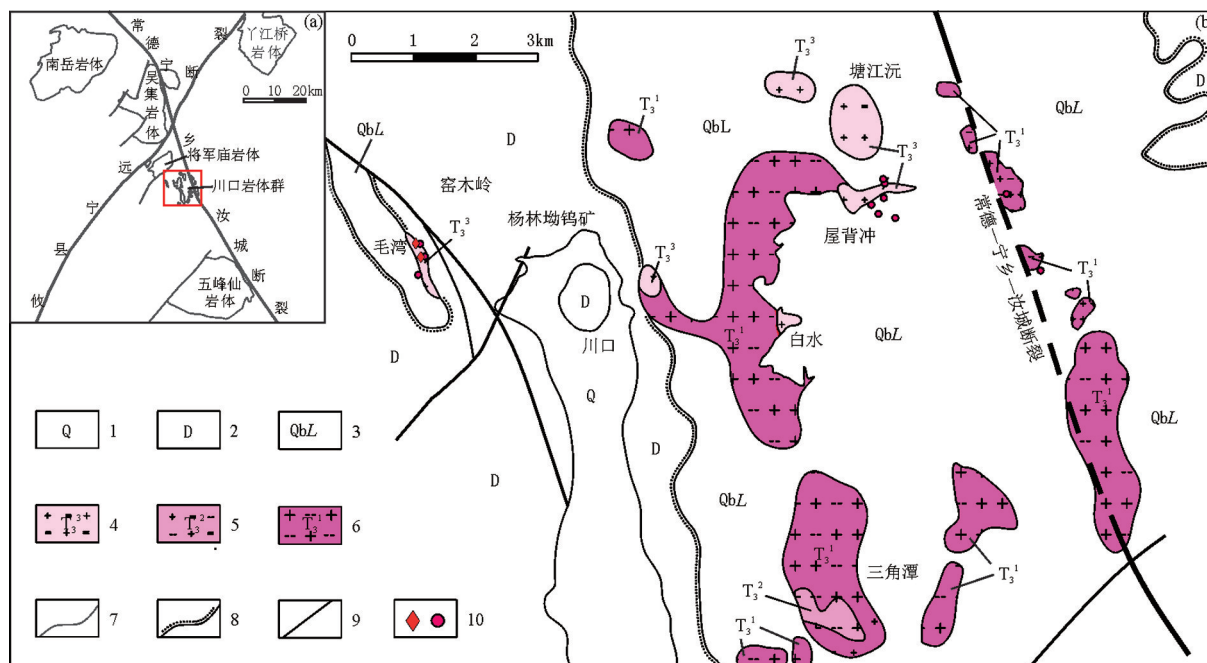


图1 川口地区地质略图

1—第四系;2—泥盆系;3—青白口系冷家溪群;4—晚三叠世第三次侵入岩;5—晚三叠世第二次侵入岩;6—晚三叠世第一次侵入岩;7—地质界线;8—不整合地质界线;9—断层;10—全分析、LA-ICP-MS测年样品取样点

Fig.1 Geological sketch map of the Chuankou area, Hunan Province

1—Quaternary; 2—Devonian; 3—Banxi Group of Neoproterozoic Qingbaikouan; 4—The third granite of late Triassic; 5—The second granite of late Triassic; 6—The first granite of late Triassic; 7—Geological boundary; 8—Angular unconformity; 9—Fault; 10—Complete chemical analysis and LA-ICP-MS sample location respectively

的连晶粒状;钾长石(约25%)多为他形,具卡氏双晶,微纹结构,包斜长石、石英、云母嵌晶;斜长石(约36%)多为自形板条状,具聚片双晶,大小不一,局部聚集为集合体状;白云母(约7%)呈片状、片状集合体状,交代长石等。石榴子石(约1%)呈自形,微晶粒状,不均匀分散分布。

钨矿化类型主要有岩浆热液石英细脉带型、石英大脉型及岩体型,与晚三叠世花岗岩密切相关。细脉型钨矿主要产于岩体接触外带;石英大脉型钨矿产于切穿花岗岩的石英脉中;岩体型钨矿产于接触内带0~200 m三叠世白云母二长花岗岩中(图2e),黑钨矿呈板状、浸染状充填于脉石矿物间(图2f),被白钨矿沿边部、内部孔隙充填交代,热液阶段矿物生成顺序为黑钨矿—黄铁矿—石英—白钨矿—萤石。

3 样品采集及分析测试方法

3.1 主量、微量元素分析

本次对川口岩体系统地采集了硅酸盐、微量、

稀土等测试样品31件,测试样品主要采自各矿区钻孔中的新鲜岩心,具较好的代表性,部分白云母二长花岗岩可见明显钨矿化,主量、微量、稀土元素分析均由国土资源部长沙矿产资源监督检测中心完成,主量元素采用X-射线荧光光谱仪(XRF)分析,微量、稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,分析参照(GB/T 14506-2010)执行,加入国家一级标准物质对准确度进行控制、加入平行分析样品对精密度进行控制,分析结果满足(DZ/T 0130-2006)的要求。

3.2 锆石U-Pb测年

采集了2件样品用于年代学分析,其中,黑云母二长花岗岩采于毛湾矿区的ZK2301孔深266.3 m处岩心(样号H-21),白云母二长花岗岩采于毛湾矿区的ZK1505孔深63.8 m处岩心(样号H-23),二者均为钻孔中的新鲜岩石。首先将样品破碎,淘洗后保留重砂部分,对重砂部分样品进行电磁分选和重液分选后得到一定纯度的锆石,然后在双目镜下仔细挑选出不同晶形、不同颜色的锆石单矿物,再在

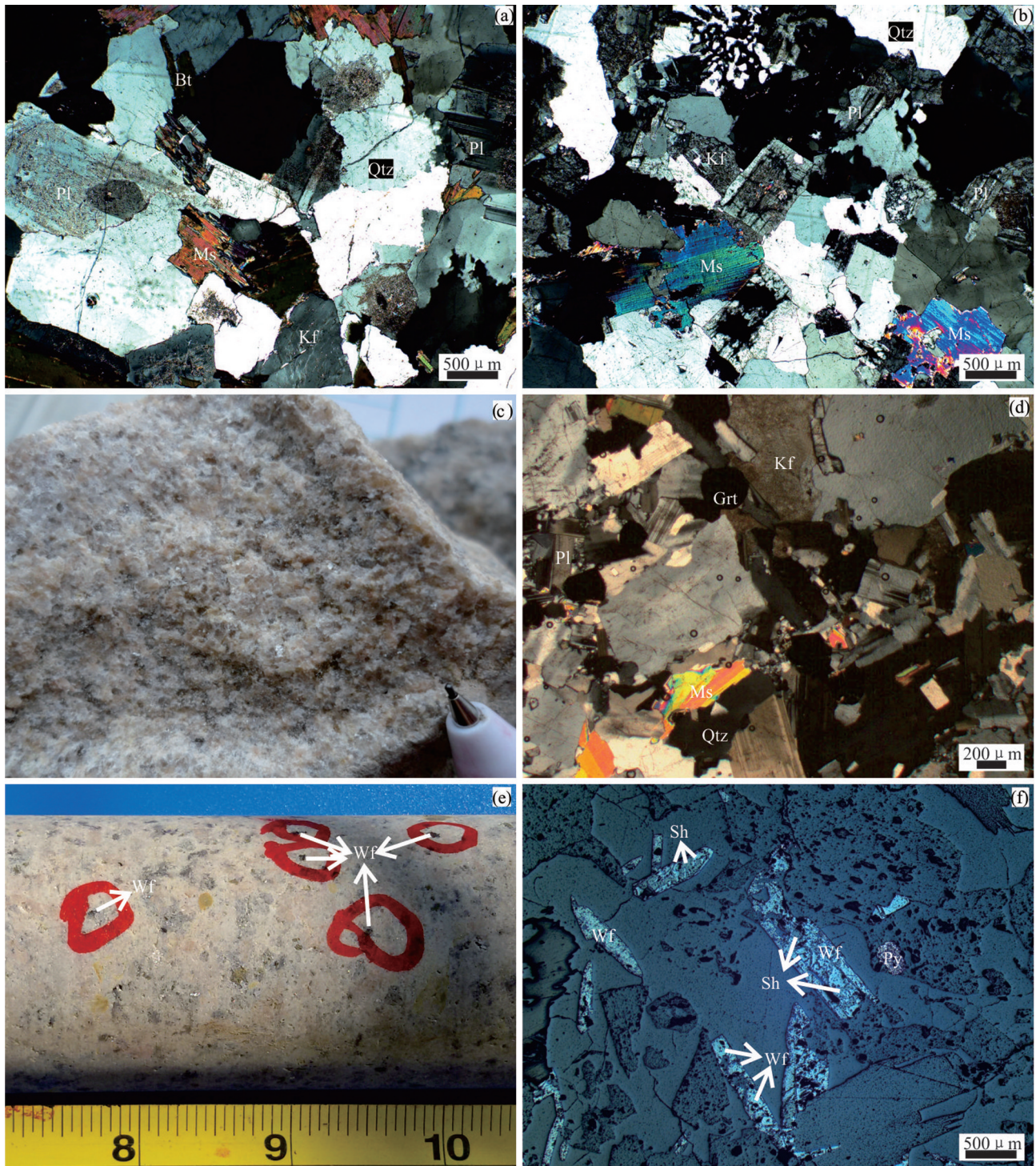


图2 川口花岗岩岩石标本和显微照片

a—黑云母二长花岗岩显微照片(+); b—二云母二长花岗岩显微照片(+); c—白云母二长花岗岩手标本; d—白云母二长花岗岩显微照片(+); e—含矿白云母二长花岗岩岩心照片; f—含矿白云母二长花岗岩显微照片(-); Qtz—石英; Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bt—黑云母; Ms—白云母; Grt—石榴子石; Wf—黑钨矿; Sh—白钨矿; Py—黄铁矿

Fig.2 Photos and micro-photographs of granite in Chuankou

a—Micro-photographs of biotite monzogranite(+); b—Micro-photographs of two-mica Monzogranite(+); c—Hand specimens of muscovite Monzogranite; d—micro-photographs of muscovite monzogranite(+); e—Core photo of W-bearing Muscovite Monzogranite; f—Micro-photographs of W-bearing muscovite monzogranite(-); Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Kf—K-feldspar; Bt—Biotite; Ms—Muscovite; Grt—Garnet; Wf—Wolframite; Sh—Scheelite; Py—Pyrite

玻璃板上对锆石进行精选。样品的制靶与测试由自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。测试是由 Newwave UP213 激光剥蚀系统 Finnigan Neptune 型 LA-ICP-MS 进行分析的。测试的标准物质为 SRM 612、锆石 91500 及锆石 Plesovice。测试时, 首先用 1 次 SRM 612 和 3 次 Plesovice 锆石进行仪器调试及外标校正; 然后每 10 个锆石样品数据, 前后各 2 个锆石 91500 及 2 个锆石 Plesovice 标样; 最后测试结束时, 用 SRM 612 测试 1 次, 再用 91500 标样、锆石 Plesovice 分别进行 2 次试验。采用线性内插法(锆石 91500 的数据)对所得的 50 个样品实验数据进行校正, 使用 ICP-MS DataCal 8.3 对数据进行处理, 再作锆石 U-Pb 年龄计算。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

川口花岗岩均具有较高的 SiO_2 含量(72.96%~77.06%, 均值 74.97%)(表 1), 高的全碱含量(ALK 为 6.72%~8.76%, 均值 7.95%), 高于中国花岗岩 7.82%(邱家骧, 1985)和略低于南岭花岗岩 8.09%(祝新友等, 2016), 在 TAS 分类图中全部落入亚碱性花岗岩中(图 3a), K_2O 含量为 3.53%~5.17%, 属于高钾钙碱性系列(图 3b)。 Al_2O_3 含量 12.60%~14.42%, MgO 含量为 0.055%~0.670%, Al_2O_3 、 MgO 与 SiO_2 之间没有明显线性关系; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 平均值为 1.34(>1); 里特曼组合指数(σ) 1.33~2.49; CaO 含量 0.08%~1.37%, CaO 含量偏低; Al_2O_3 平均值 13.68%, 铝饱和度指数 ASI 值(Al 与 Ca 、 Na 、 K 分子比) 1.04~1.56, 平均值为 1.18, ANK 值(Al 与 Na 、 K 分子比) 为 1.17~1.60, 平均值为 1.29; 低 Mg/Fe (0.07~0.39, 均值 0.20); $CIPW$ 标准矿物刚玉分子为 0.72~5.32, 均值 2.09, 川口花岗岩在化学成分上表现出高 SiO_2 , 富 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$, 低钙、铁、镁的特点, 岩石系列应属于高钾钙碱性强过铝质花岗岩。

4.2 稀土和微量元素

川口花岗岩中三种花岗岩的微量元素变化特征类似, 均富集大离子亲石元素 Ba 、 K 和高场强元素 Ta , 而亏损大离子亲石元素 Sr 和相容元素 P 、 Ti 等, 表明它们可能来自同一岩浆源(柴云等, 2019)。在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图 4)上,

均呈“海鸥式”分布, 稀土元素总量均偏低。区内花岗岩稀土总量变化较大, 赋矿白云母二长花岗岩稀土总量 ΣREE 较低(表 1), 为 $17.52\times 10^{-6}\sim 36.98\times 10^{-6}$ (均值 24.12×10^{-6}), 二云母二长花岗岩稀土总量 ΣREE 为 $54.03\times 10^{-6}\sim 55.38\times 10^{-6}$ (均值 54.70×10^{-6}), 黑云母二长花岗岩稀土总量 ΣREE 较高, 为 $99.67\times 10^{-6}\sim 148.50\times 10^{-6}$ (均值 120.36×10^{-6})。轻稀土相对较富集, 轻重稀土分异不明显, LREE/HREE 为 1.72~10.68。均具有强烈的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.03\sim 0.51$), 表明花岗岩体经历了高度演化, 白云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩 δEu 值、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值明显低于黑云母二长花岗岩, 表明黑云母二长花岗岩轻重稀土元素分馏程度高于前者。

5 锆石 U-Pb 年龄

测年锆石在显微镜下大部分呈无色透明(图 5), 粒径 50 μm , 锆石的形态复杂多样, 大部分呈自形柱状, 长短轴之比为 1:1~1:3, 锆石边部具有明显的震荡环带, 有些锆石具有残留核(图 5a 中测点 16)。锆石的 Th/U 值在一定程度上能指示变质或岩浆成因(吴元保等, 2004; 夏菲等, 2017), $\text{H}-21$ 、 $\text{H}-23$ 测点 Th/U 值为 0.28~2.01(表 2), 阴极发光图像及 Th/U 值特征表明, 所测锆石为典型的岩浆锆石(向安平, 2018)。样品 $\text{H}-21$: 共选取 30 粒晶体生长环带比较发育的淡黄色锆石进行了测试, 在 30 个测点中, 其中有 3 个点(5、16、29)谐和度小于 95% 不予采用, 1、18 号点位于核边交界或核部, 不代表成岩时代, 24 号测点年龄值较其他显著(242.2 Ma), Th 含量较高, 为 1415.3×10^{-6} , Th/U 值为 2.01, 应代表残留锆石年龄。其他 24 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 219.8~228.4 Ma, 加权平均年龄为 $(223.1\pm 0.78)\text{Ma}$, $\text{MSWD}=0.98$, 这一年龄代表黑云母二长花岗岩的结晶年龄(图 6a、b)。样品 $\text{H}-23$: 该样品共选取 20 粒晶体生长环带比较发育的淡黄色锆石进行了测试, $\text{Th}=178.0\times 10^{-6}\sim 847.8\times 10^{-6}$, $\text{U}=230.9\times 10^{-6}\sim 1794.8\times 10^{-6}$, 在 20 个测点中, 其中有 8 个点谐和度小于 95% 不予采用, 测点 10(63.3 Ma)、12(144.0 Ma)、13(242.6 Ma)年龄值较其他显著, 测点 10、12 应为受后期热液的强烈交代作用影响锆石, 测点 13 应为残留锆石。其他 9 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 221.9~227.7 Ma, 其加权平均年龄为

表1 川口地区花岗岩主量(%)和微量元素(10^{-6})分析结果
Table1 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) compositions of granite in Chuankou

岩性	白云母二长花岗岩										二云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩						南岭花岗岩
	H11 - H15	KH36	KH32	KH35	KH38	KH39	KH40	KH42	KH43	KH37	H16 - H18	H18 - H20	KH31	KH45	KH46	KH47	KH48	H2 - H5	
SiO ₂	75.06	77.06	75.45	75.61	74.72	76.52	75.75	76.96	75.27	75.33	76.67	75.91	72.96	73.49	73.59	73.14	73.05	72.97	74.63
TiO ₂	0.05	0.06	0.03	0.07	0.05	0.04	0.03	0.04	0.06	0.03	0.04	0.04	0.12	0.26	0.19	0.19	0.20	0.24	0.08
Al ₂ O ₃	14.07	13.22	13.75	14.31	14.33	13.29	13.55	12.91	14.42	13.84	12.60	13.14	13.89	13.78	13.90	13.97	13.70	13.59	13.10
Fe ₂ O ₃	0.36	0.36	0.19	0.42	0.26	0.27	0.22	0.25	0.24	0.28	0.30	0.36	0.29	0.37	0.44	0.29	0.49	0.67	0.58
FeO	0.38	0.28	0.30	0.36	0.36	0.36	0.39	0.32	0.45	0.34	0.15	0.17	0.86	1.55	1.08	1.24	1.33	1.07	1.31
MgO	0.06	0.11	0.08	0.14	0.08	0.06	0.06	0.17	0.07	0.11	0.08	0.07	0.29	0.59	0.45	0.44	0.49	0.67	0.21
CaO	0.31	0.08	0.38	0.12	0.44	0.61	0.30	0.24	0.31	0.28	0.69	0.59	0.57	1.27	1.11	1.08	1.25	1.37	0.87
Na ₂ O	4.33	2.25	3.99	2.29	3.86	4.57	4.33	2.49	4.11	3.73	3.36	3.84	3.46	3.30	3.48	3.46	3.44	3.26	3.43
K ₂ O	3.77	4.47	4.77	4.77	4.64	3.53	3.89	4.82	4.11	4.40	4.37	4.51	5.17	4.38	4.74	5.01	4.43	4.80	4.66
MnO	0.21	0.02	0.07	0.05	0.10	0.08	0.17	0.04	0.17	0.12	0.06	0.06	0.06	0.09	0.08	0.08	0.10	0.06	0.11
P ₂ O ₅	0.10	0.02	0.07	0.03	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.09	0.02	0.02	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.08	0.05
H ₂ O ⁻	0.63	0.31	0.59	0.39	0.40	0.34	0.39	0.30	0.22	0.38	0.52	0.37	0.45	0.19	0.35	0.35	0.30	0.69	/
LOI	0.71	1.41	0.73	1.49	0.89	0.56	0.64	1.12	0.62	0.80	1.00	0.74	1.57	0.59	0.69	0.80	1.29	0.59	/
Total	99.94	99.63	100.32	100.02	100.13	100.22	99.72	99.66	100.04	99.64	99.83	99.81	99.69	99.86	100.10	100.05	100.07	99.97	/
K ₂ O/Na ₂ O	0.88	1.99	1.20	2.08	1.20	0.77	0.90	1.94	1.00	1.18	1.31	1.18	1.49	1.33	1.36	1.45	1.29	1.48	1.36
ASI	1.20	1.52	1.11	1.56	1.18	1.07	1.14	1.32	1.22	1.21	1.10	1.07	1.13	1.10	1.08	1.07	1.08	1.04	/
ANK	1.26	1.55	1.17	1.60	1.26	1.17	1.20	1.39	1.29	1.27	1.23	1.18	1.23	1.35	1.28	1.26	1.31	1.29	/
Mg/Fe	0.07	0.17	0.16	0.18	0.14	0.09	0.10	0.30	0.10	0.18	0.17	0.13	0.25	0.31	0.30	0.29	0.27	0.39	/
C	2.57	4.67	1.51	5.32	2.35	1.01	1.86	3.38	2.87	2.67	1.15	0.92	1.78	1.48	1.20	1.05	1.14	0.72	/
Sr	6.86	4.93	9.14	6.64	2.68	4.79	7.17	14.76	3.15	5.42	11.58	11.07	59.76	56.51	58.26	49.10	50.37	86.14	30.20
Ba	20.57	20.13	43.50	40.78	14.38	10.18	27.49	69.80	14.58	24.11	17.77	15.27	280.20	165.70	186.50	183.50	164.40	263.65	92.50
Nb	40.95	27.69	19.60	29.02	19.66	12.71	13.77	12.17	30.57	16.25	17.10	13.70	10.76	19.20	15.46	17.49	18.41	18.78	35.60
Ta	14.20	6.91	5.84	8.35	4.31	4.00	4.18	3.92	6.18	4.12	5.63	3.39	2.43	3.35	2.76	2.81	3.13	4.99	12.20
Sb	3.15	6.76	2.26	4.14	0.56	0.56	3.60	18.15	0.76	0.86	6.44	5.09	0.51	0.27	0.95	0.55	0.37	0.45	1.20
W	386.00	380.00	1700.00	270.00	600.00	260.00	230.00	290.00	170.00	210.00	380.00	817.00	270.00	340.00	200.00	190.00	170.00	328.00	29.00
Mo	5.69	0.35	0.35	0.57	0.35	0.35	0.97	0.48	0.35	0.83	3.74	1.32	0.35	0.34	0.33	0.30	0.32	0.51	13.55
Bi	27.10	1.54	0.88	2.86	0.61	5.55	0.45	18.40	5.70	1.20	2.24	3.18	0.70	0.97	1.06	1.05	1.53	2.57	7.92
Sn	32.06	26.09	6.11	26.42	16.84	4.88	6.69	5.38	13.98	10.01	16.33	19.40	5.02	8.02	6.58	6.57	7.94	13.92	/
Y	14.87	4.71	7.20	6.53	6.04	5.32	12.89	5.87	18.86	7.34	19.24	19.69	14.62	16.67	14.92	11.78	10.61	23.14	51.70
La	2.54	3.57	3.46	3.83	3.79	3.15	4.00	3.80	4.51	4.05	8.16	8.32	21.89	26.78	26.52	20.67	23.19	30.32	20.00
Ce	7.86	6.54	6.47	7.11	8.68	5.92	8.28	7.40	10.50	8.55	19.75	20.16	44.16	55.11	55.10	42.10	47.23	60.75	42.70
Pr	1.10	0.90	0.79	0.89	1.19	0.73	1.06	0.92	1.41	1.08	2.58	2.61	5.18	6.48	6.45	5.02	5.61	7.24	5.52
Nd	3.97	3.12	2.78	3.22	4.10	2.47	3.74	3.22	5.14	3.95	9.41	9.52	18.64	22.98	23.01	17.64	20.17	26.24	21.60
Sm	1.73	1.04	0.96	0.98	1.45	0.89	1.33	0.98	1.78	1.40	2.70	2.78	3.86	4.64	4.72	3.77	4.11	6.01	7.43
Eu	0.01	0.04	0.07	0.06	0.03	0.04	0.05	0.09	0.03	0.06	0.06	0.05	0.59	0.47	0.48	0.45	0.47	0.59	0.15
Gd	1.08	0.69	0.66	0.73	0.88	0.63	0.95	0.72	1.28	0.94	1.88	1.92	3.04	3.73	3.66	2.89	3.04	4.78	7.49
Tb	0.32	0.15	0.17	0.16	0.19	0.14	0.27	0.17	0.40	0.22	0.40	0.41	0.52	0.60	0.58	0.48	0.48	0.76	1.79
Dy	2.26	0.90	1.31	1.09	1.13	1.00	2.04	1.13	3.03	1.35	2.68	2.81	2.82	3.29	2.99	2.51	2.35	4.20	11.59
Ho	0.44	0.16	0.24	0.22	0.20	0.17	0.43	0.22	0.61	0.25	0.61	0.65	0.54	0.63	0.58	0.46	0.44	0.89	2.28
Er	1.39	0.53	0.81	0.73	0.67	0.62	1.51	0.67	1.95	0.87	1.95	2.03	1.60	1.76	1.60	1.33	1.16	2.65	7.14
Tm	0.35	0.13	0.22	0.19	0.28	0.15	0.44	0.16	0.55	0.22	0.40	0.42	0.30	0.34	0.31	0.25	0.20	0.45	1.30
Yb	3.17	1.20	1.82	1.50	1.68	1.38	4.17	1.40	4.93	1.81	2.99	3.17	2.11	2.43	2.14	1.79	1.49	3.10	8.97
Lu	0.53	0.20	0.34	0.27	0.27	0.23	0.72	0.24	0.86	0.33	0.50	0.53	0.36	0.42	0.37	0.31	0.28	0.53	1.35
ΣREE	26.76	19.17	20.10	20.98	24.54	17.52	28.99	21.12	36.98	25.08	54.03	55.38	105.61	129.66	128.51	99.67	110.22	148.50	139.31
ΣLREE	17.22	15.21	14.53	16.09	19.24	13.20	18.46	16.41	23.37	19.09	42.65	43.44	94.32	116.46	116.28	89.65	100.78	131.15	97.40
ΣHREE	9.54	3.96	5.57	4.89	5.30	4.32	10.53	4.71	13.61	5.99	11.38	11.94	11.29	13.20	12.23	10.02	9.44	17.35	41.91
LREE/HREE	1.96	3.84	2.61	3.29	3.63	3.06	1.75	3.48	1.72	3.19	3.75	3.64	8.35	8.82	9.51	8.95	10.68	7.56	2.32
δEu	0.03	0.14	0.25	0.21	0.08	0.16	0.13	0.31	0.06	0.15	0.07	0.06	0.51	0.33	0.34	0.40	0.39	0.33	0.06
(La/Yb) _n	0.63	2.01	1.28	1.72	1.52	1.54	0.65	1.83	0.62	1.51	1.84	1.77	6.99	7.43	8.35	7.79	10.49	6.66	1.50

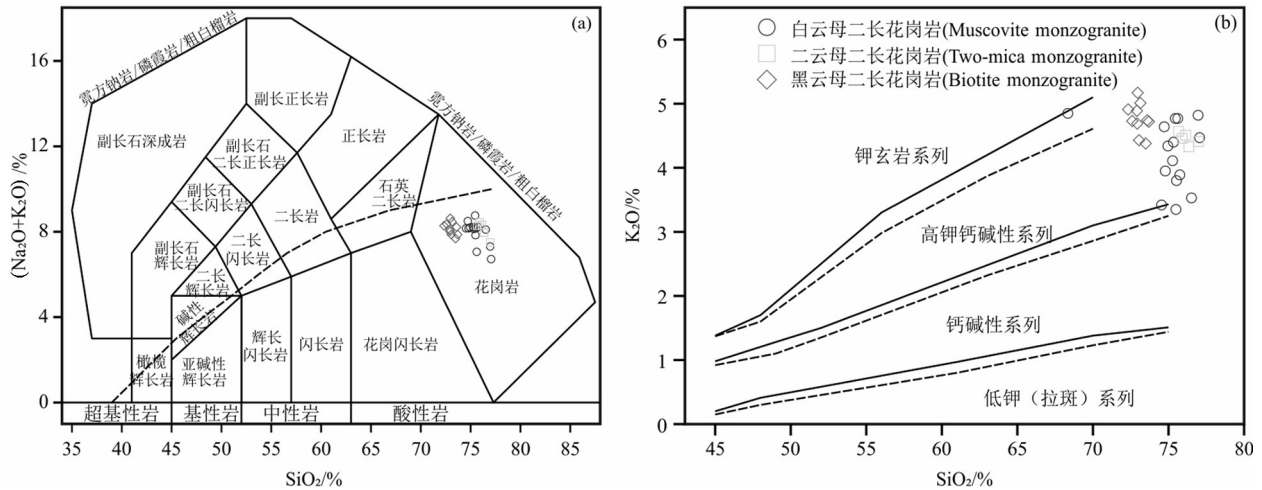


图3 川口侵入岩TAS分类图解(a)(据Middlemost,1994;Irvine and Baragar, 1971); SiO₂-K₂O图解(b)(岩石系列分界线据Rickwood,1989)

Fig.3 TAS classification diagram of intrusive rocks from Chuankou(a)(after Middlemost,1994;Irvine and Baragar,1971); SiO₂-K₂O diagram(b)(after Rickwood,1989)

(224.6±1.31)Ma, MSWD=0.33, 这个年龄代表赋矿白云母二长花岗岩的结晶年龄(图6c、d)。

6 讨论

6.1 成岩成矿时代

川口岩体的研究程度较低, 20世纪70年代开展1:20万区域地质调查时对该岩体进行了黑云母K-Ar法年龄测试, 测定川口岩体成岩年龄为176 Ma、164 Ma(柏道远等, 2005)。在近年开展的1:5万区域地质矿产调查中, 在三角潭矿区对石英脉型钨矿伴生的辉钼矿开展了Re-Os同位素定年及花岗岩SHRIMP、LA-ICP-MS锆石U-Pb定年, 获得成矿年龄为(224.9±1.3)Ma, 黑云母二长花岗岩为形成时代为(223.1±2.6)Ma(彭能立等, 2017)。

本次进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测试, 获得黑云母二长花岗岩锆石年龄集中于219.8~228.4 Ma, 白云母二长花岗岩大多集中于221.9~227.7 Ma, 岩体型钨矿赋矿白云母二长花岗岩谐和年龄(224.6±1.31)Ma及赋矿围岩黑云母二长花岗岩协和年龄(223.1±0.78)Ma, 时代为晚三叠世, 属印支期花岗岩。这与彭能立等(2017)获得的石英脉型的钨矿成矿时代基本一致, 说明川口岩体型钨矿为印支期成矿, 其成矿时代为224 Ma左右。

6.2 岩石成因

目前最为普遍接受和常用的花岗岩成因分类为S-I-M-A(Chappell et al., 1974, 2001), 而以幔

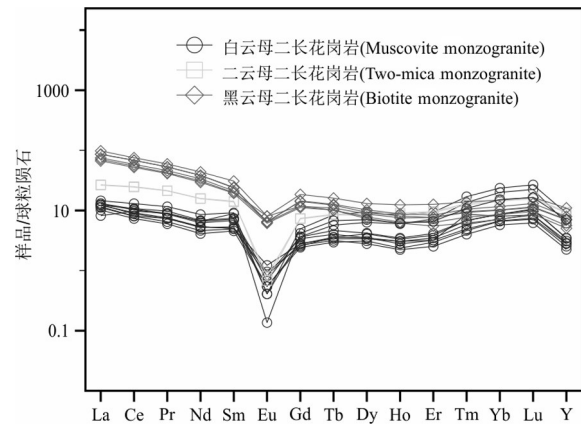
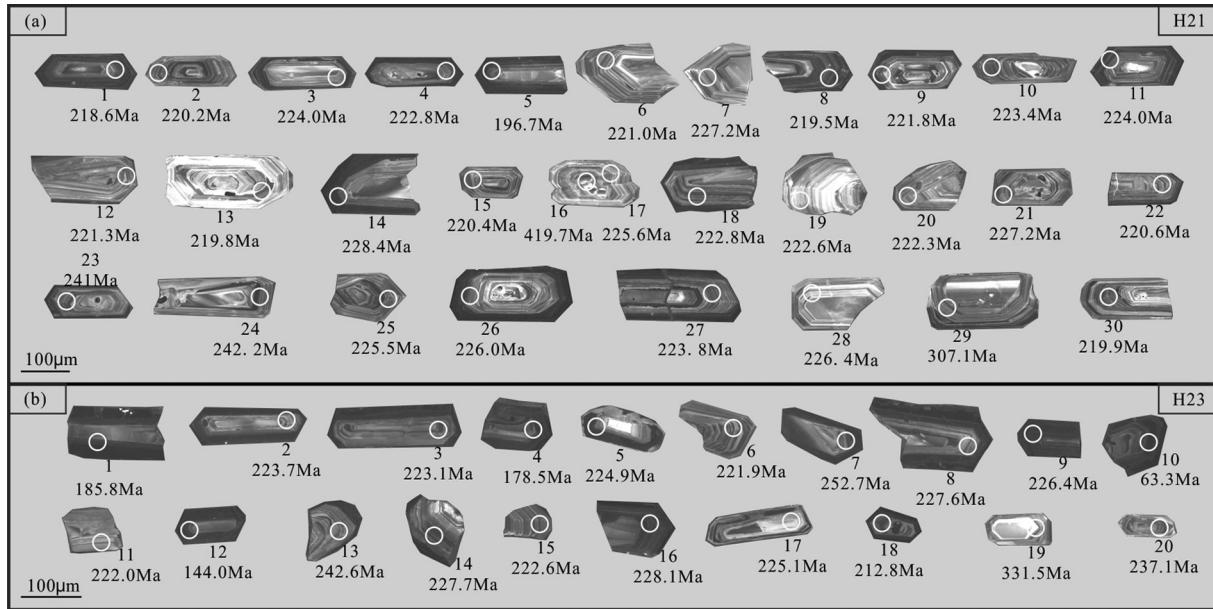


图4 川口花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分配图解(标准化值据Sun and Mcdonough,1989)

Fig.4 Chondrite-normalized REE pattern diagram of the Chuankou granites(normalization values after Sun and Mcdonough,1989)

源岩浆成因的M型花岗岩极少(李猛星, 2019)。角闪石、堇青石和碱性铁镁矿物是区分I、S、A三种类型花岗岩的有效标志(吴福元, 2007)。

川口花岗岩不含碱性暗色矿物, 具有高硅(均值74.97%), 高全碱含量(均值7.95%), 高K₂O/Na₂O(均值1.34), 过铝质(均值1.18)的特点, 同时具有低CaO, 低磷, 低钛等特点, 分异指数(DI) > 92, 稀土元素的配分模式为右倾型, 具有强烈的Eu负异常(δEu=0.03~0.51)。显然不具A型花岗岩特征, 且经历了高强度的分异作用, 应为高分异的I型或者S型花岗岩。

图5 湖南川口花岗岩测年锆石CL图像、测点编号及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄Fig.5 Cathode luminescence images, test number and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons from Chuankou pluton in Hunan

实验研究表明, P_2O_5 在弱过铝质和强过铝质岩浆中随 SiO_2 增加变化趋势不同(Pichavant et al., 1992; Wolf et al., 1994), 这种变化趋势可以作为一种有效的手段来区分I型和S型花岗岩类判别(Chappell, 1999; Wu et al., 2003; Li et al., 2006; 李献华等, 2007)。在 SiO_2 - P_2O_5 相关图上(图7), 数据点总体分布在一个分散的“三角形”区域, 与S型花岗岩演化趋势一致。富Y矿物会在过铝质岩浆演化的早期阶段结晶出来, 从而引起分异的S型花岗岩的Y含量低(李献华等, 2007), 川口花岗岩表现出低Y(4.71~23.14), CIPW标准矿物刚玉分子($>1\%$)。此外, 川口花岗岩含白云母及石榴子石。这些特征均表明, 川口花岗岩岩石学、地球化学特征与I型花岗岩不同, 具有高分异S型花岗岩特征。

6.3 构造环境判别

川口地区处于扬子地块与华南地块的接合带, 早中生代两期构造挤压, 地壳增厚(张岳桥等, 2009), 中三叠世末(233~210 Ma)挤压应力松弛, 深部压力降低使地壳发生部分熔融(王德慈等, 2003), 形成了印支期过铝质富钾花岗岩(王岳军等, 2002; 柏道远等, 2005, 2007a)。

川口花岗岩里特曼指数平均为2.02, 属高钾钙碱性系列强过铝(SP)花岗岩, 根据构造环境图解判别(Maniar et al., 1989)(图8), 只有少数样品落入

RRG+CEUG一侧外, 绝大部分(图8a、b、c)或者全部(图8d)样品点落入IAG+CAG+CCG区, 且有较多样品位于与POG重叠区之外, 因此岩体应属于IAG+CAG+CCG组类型, IAG和CAG的ASI一般小于1.15, 而CCG的ASI一般大于1.15(肖庆辉等, 2002), 川口花岗岩ASI均值为1.18, 进一步可判断为大陆碰撞花岗岩类(CCG)。与前人研究的湘东南印支期花岗岩形成于碰撞环境下弱挤压构造体制(柏道远等, 2007b、c)及对南岭东段印支期强过铝(SP)花岗岩的研究结论一致。

6.4 岩浆活动与钨成矿的关系

川口岩体型钨矿的成矿与岩浆演化、侵位及后期的蚀变直接关联。成矿专属性主要取决于成矿流体的成矿元素、挥发分等组分含量(柏道远等, 2007d), 川口花岗岩为高分异S型花岗岩, 其源区物质主要为壳源变质沉积岩(Chappell et al., 1974; 柏道远等, 2007a), 上地壳钨丰度在地球各圈层中最高(马东升, 2009), 川口花岗岩中的W含量(均值 399.5×10^{-6})远高于南岭花岗岩(均值 29×10^{-6}), 可为成矿作用的发生提供丰富的物源。稀土元素总量主要与不同类型钨矿床成矿物质来源有关(秦燕等, 2019), 研究区三种类型花岗岩的稀土元素变化特征类似, 表明它们可能来自同一岩浆源。但白云母二长花岗岩具更低的 δEu 值及晚期的萤石脉的出

表 2 川口岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of Chuankou Pluton

测点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma						谐和度
	Pb*	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
黑云母二长花岗岩(H-21)																	
1*	411.8	618.1	1553.7	0.40	0.0520	0.0010	0.2436	0.0043	0.0345	0.0006	286.4	42.4	221.4	3.5	218.6	3.7	99%
2	373.5	562.8	568.2	0.99	0.0502	0.0010	0.2445	0.0044	0.0348	0.0006	202.3	43.9	222.1	3.6	220.2	3.7	99%
3	270.7	374.5	449.9	0.83	0.0492	0.0010	0.2429	0.0048	0.0354	0.0006	156.9	47.6	220.8	3.9	224.0	3.8	99%
4	306.5	415.8	534.9	0.78	0.0523	0.0010	0.2549	0.0047	0.0352	0.0006	296.9	43.6	230.6	3.8	222.8	3.8	97%
5*	855.8	1178.2	2318.3	0.51	0.0559	0.0011	0.2279	0.0040	0.0310	0.0005	446.8	41.1	208.5	3.3	196.7	3.3	94%
6	152.2	234.9	392.4	0.60	0.0510	0.0010	0.2498	0.0046	0.0349	0.0006	239.5	44.3	226.4	3.8	221.0	3.8	98%
7	120.4	177.2	253.9	0.70	0.0503	0.0010	0.2494	0.0047	0.0359	0.0006	206.6	45.6	226.0	3.9	227.2	3.9	99%
8	253.5	346.1	1140.9	0.30	0.0526	0.0011	0.2530	0.0052	0.0346	0.0006	310.5	47.6	229.0	4.2	219.5	3.8	96%
9	192.8	272.0	556.2	0.49	0.0526	0.0010	0.2549	0.0047	0.0350	0.0006	309.7	43.6	230.5	3.8	221.8	3.8	96%
10	235.5	371.8	511.6	0.73	0.0508	0.0010	0.2518	0.0050	0.0353	0.0006	232.8	46.6	228.0	4.0	223.4	3.8	98%
11	1526.7	1951.7	1572.9	1.24	0.0509	0.0010	0.2482	0.0045	0.0354	0.0006	237.7	43.8	225.1	3.7	224.0	3.8	100%
12	335.9	435.5	517.3	0.84	0.0520	0.0010	0.2501	0.0048	0.0349	0.0006	284.9	45.0	226.7	3.9	221.3	3.8	98%
13	125.0	155.3	561.0	0.28	0.0519	0.0010	0.2462	0.0047	0.0347	0.0006	279.2	44.7	223.5	3.8	219.8	3.8	98%
14	1072.4	1271.1	3855.8	0.33	0.0498	0.0009	0.2493	0.0045	0.0361	0.0006	183.9	43.3	226.0	3.6	228.4	3.9	99%
15	340.1	457.8	456.0	1.00	0.0507	0.0010	0.2473	0.0047	0.0348	0.0006	225.4	45.4	224.4	3.9	220.4	3.8	98%
16*	1464.0	874.8	519.7	1.68	0.0655	0.0013	0.6056	0.0110	0.0673	0.0012	790.4	39.4	480.8	7.0	419.7	7.1	87%
17	139.2	189.0	337.4	0.56	0.0514	0.0011	0.2532	0.0050	0.0356	0.0006	259.6	46.2	229.2	4.0	225.6	3.9	98%
18*	491.6	654.5	646.8	1.01	0.0516	0.0010	0.2528	0.0047	0.0352	0.0006	267.2	44.2	228.8	3.8	222.8	3.8	97%
19	121.0	160.8	300.8	0.53	0.0501	0.0010	0.2432	0.0049	0.0351	0.0006	198.2	47.3	221.0	4.0	222.6	3.8	99%
20	239.6	305.9	410.4	0.75	0.0517	0.0011	0.2443	0.0049	0.0351	0.0006	273.2	46.4	221.9	4.0	222.3	3.8	100%
21	264.8	376.0	602.0	0.62	0.0502	0.0010	0.2504	0.0047	0.0359	0.0006	205.5	44.8	226.9	3.8	227.2	3.9	100%
22	328.5	469.8	601.2	0.78	0.0522	0.0011	0.2557	0.0052	0.0348	0.0006	293.2	47.1	231.2	4.2	220.6	3.8	95%
23	279.0	421.8	535.4	0.79	0.0516	0.0010	0.2552	0.0050	0.0352	0.0006	269.0	45.4	230.8	4.0	223.2	3.9	97%
24*	902.0	1415.3	704.6	2.01	0.0509	0.0011	0.2671	0.0059	0.0383	0.0007	236.6	50.9	240.4	4.8	242.2	4.2	99%
25	289.9	422.9	514.5	0.82	0.0505	0.0010	0.2488	0.0047	0.0356	0.0006	218.2	45.1	225.6	3.9	225.5	3.9	100%
26	252.7	373.0	455.2	0.82	0.0500	0.0010	0.2470	0.0048	0.0357	0.0006	196.7	46.2	224.1	3.9	226.0	3.9	99%
27	293.2	431.9	540.5	0.80	0.0516	0.0010	0.2474	0.0048	0.0353	0.0006	269.5	45.2	224.5	3.9	223.8	3.9	100%
28	170.9	246.1	399.5	0.62	0.0501	0.0010	0.2396	0.0048	0.0357	0.0006	197.2	46.8	218.1	3.9	226.4	3.9	96%
29*	280.3	291.9	508.8	0.57	0.0595	0.0012	0.4048	0.0079	0.0488	0.0009	584.3	42.7	345.1	5.7	307.1	5.3	89%
30	504.2	727.9	1184.7	0.61	0.0500	0.0010	0.2516	0.0050	0.0347	0.0006	194.6	46.8	227.8	4.1	219.9	3.8	97%
白云母二长花岗岩(H-23)																	
1*	609.1	847.8	1724.0	0.49	0.0645	0.0012	0.2617	0.0048	0.0292	0.0005	758.5	39.6	236.0	3.9	185.8	3.2	79%
2	189.3	277.3	292.6	0.95	0.0490	0.0011	0.2434	0.0055	0.0353	0.0006	149.9	52.2	221.2	4.5	223.7	3.9	99%
3*	187.8	267.3	573.9	0.47	0.0505	0.0012	0.2630	0.0060	0.0352	0.0006	216.8	51.8	237.0	4.8	223.1	3.9	94%
4*	381.9	572.9	1794.8	0.32	0.0583	0.0011	0.2308	0.0043	0.0281	0.0005	539.0	42.4	210.8	3.6	178.5	3.1	85%
5	187.5	240.9	872.0	0.28	0.0503	0.0010	0.2527	0.0047	0.0355	0.0006	207.9	44.3	228.8	3.8	224.9	3.9	98%
6	376.9	531.7	576.0	0.92	0.0501	0.0010	0.2475	0.0048	0.0350	0.0006	199.6	45.4	224.5	3.9	221.9	3.8	99%
7*	458.8	570.0	539.6	1.06	0.0738	0.0014	0.4115	0.0078	0.0400	0.0007	1037.1	38.9	350.0	5.6	252.7	4.4	72%
8	201.4	289.4	345.3	0.84	0.0503	0.0013	0.2520	0.0062	0.0359	0.0007	206.6	56.5	228.2	5.0	227.6	4.0	100%
9	482.0	680.8	1692.5	0.40	0.0517	0.0010	0.2502	0.0046	0.0357	0.0006	270.0	43.0	226.8	3.7	226.4	3.9	100%
10*	165.9	639.4	1391.5	0.46	0.0510	0.0017	0.0642	0.0021	0.0099	0.0002	240.5	75.2	63.2	2.0	63.3	1.2	100%
11	130.0	182.9	292.7	0.62	0.0499	0.0011	0.2465	0.0052	0.0350	0.0006	192.1	49.0	223.7	4.3	222.0	3.9	99%
12*	176.8	479.5	957.8	0.50	0.0515	0.0011	0.1551	0.0033	0.0226	0.0004	264.9	49.4	146.4	2.9	144.0	2.6	98%
13*	198.5	272.6	442.0	0.62	0.0511	0.0010	0.2653	0.0053	0.0384	0.0007	246.3	46.2	238.9	4.3	242.6	4.2	98%
14	234.2	319.5	909.5	0.35	0.0498	0.0010	0.2534	0.0050	0.0360	0.0006	187.3	46.3	229.3	4.1	227.7	4.0	99%
15	368.8	523.7	623.0	0.84	0.0499	0.0010	0.2480	0.0050	0.0351	0.0006	190.6	46.7	225.0	4.1	222.6	3.9	99%
16*	671.3	675.7	1573.3	0.43	0.0634	0.0012	0.3225	0.0062	0.0360	0.0006	720.8	41.0	283.8	4.8	228.1	4.0	80%
17	145.4	210.4	230.9	0.91	0.0525	0.0012	0.2512	0.0060	0.0355	0.0007	306.1	52.9	227.5	4.9	225.1	4.0	99%
18*	139.0	178.0	271.7	0.66	0.0528	0.0013	0.2520	0.0063	0.0336	0.0006	320.5	55.2	228.2	5.1	212.8	3.9	93%
19*	294.5	289.2	533.6	0.54	0.0615	0.0013	0.4600	0.0093	0.0528	0.0009	656.1	42.9	384.3	6.5	331.5	5.8	86%
20*	255.7	351.8	411.4	0.86	0.0487	0.0012	0.2465	0.0063	0.0375	0.0007	134.5	58.6	223.7	5.1	237.1	4.2	94%

注: Pb*为放射性成因Pb; *未参加年龄计算。

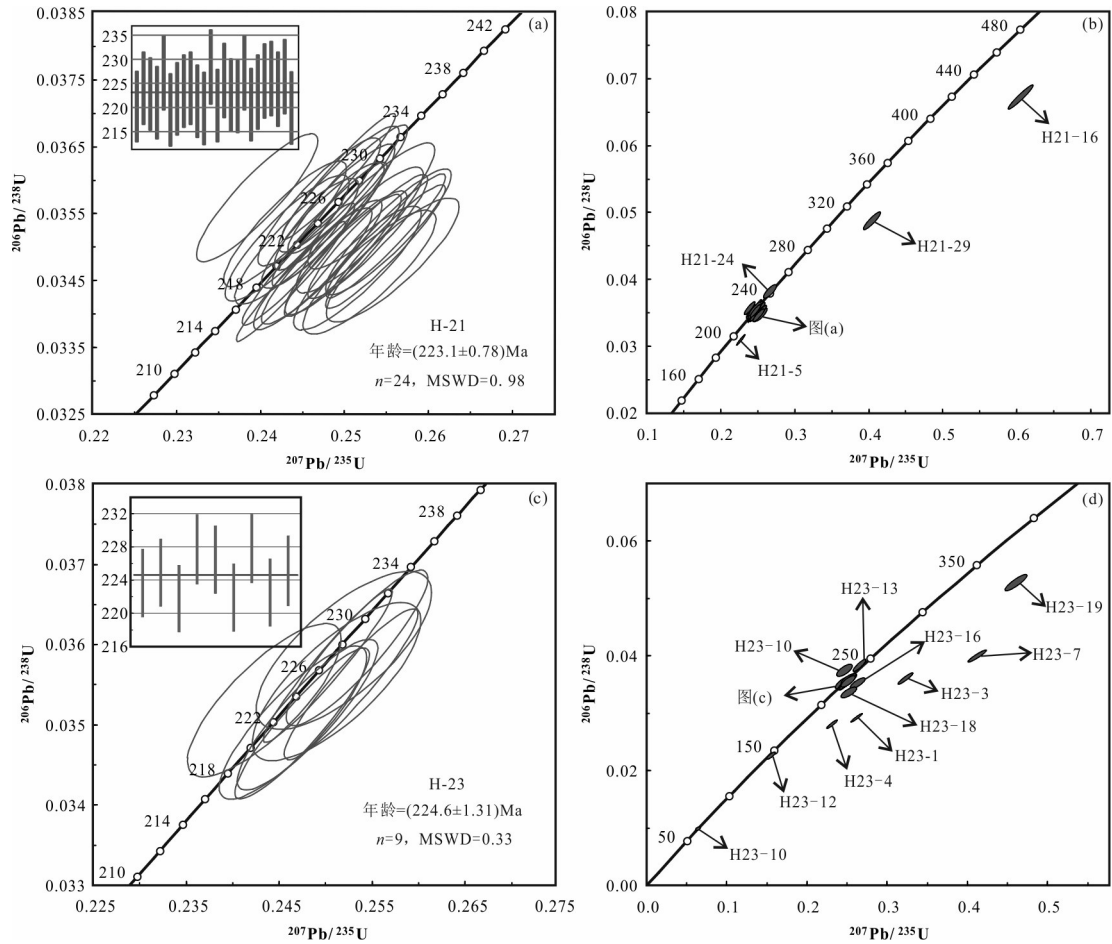


图6 川口花岗岩锆石U-Pb谐和图

Fig.6 U-Pb concordia diagrams of zircons from the Chuankou granites

现,表明其经过更充分的分异。大地构造环境制约着成矿花岗岩的空间就位,川口岩体形成于后碰撞环境下的弱挤压构造体制中,侵位时断裂及裂隙发育较差,成矿流体被封闭在岩体内部,岩浆上侵时的空间虚脱部位易形成岩体型钨矿。从成岩年龄来看,所测花岗岩均为印支期成岩,但值得注意的是,白云母二长花岗岩中有一组锆石年龄为144.0~185.8 Ma的数据,显示该花岗岩的演化可能持续至燕山早期。

7 结论

(1)川口细粒白云母二长花岗岩是岩体型钨矿的赋矿岩体,黑钨矿呈浸染状分布于花岗岩中,细粒白云母二长花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb加权平均年龄为(224.6±1.31)Ma,该结晶年龄代表了成矿年龄。与川口矿田三角潭钨矿成矿年龄(224.9±

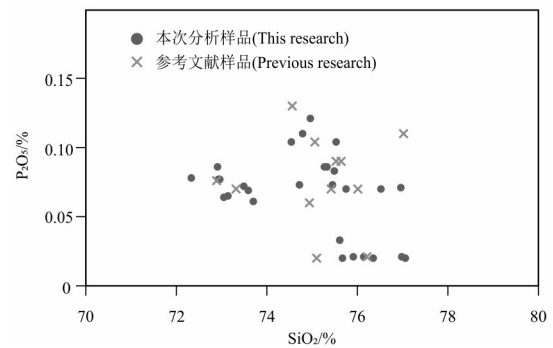


图7 川口花岗岩SiO₂-P₂O₅相关图

(参考文献样品数据引自柏道远等,2007a;王宾海等,2016)

Fig.7 SiO₂-P₂O₅ diagrams of the Chuankou granites

(The references data of highly fractionated granites from Bai Daoyuan et al.,2007a;Wang Binhai et al.,2016)

1.3)Ma一致,表明三叠纪爆发式成矿至少持续到印支晚期。

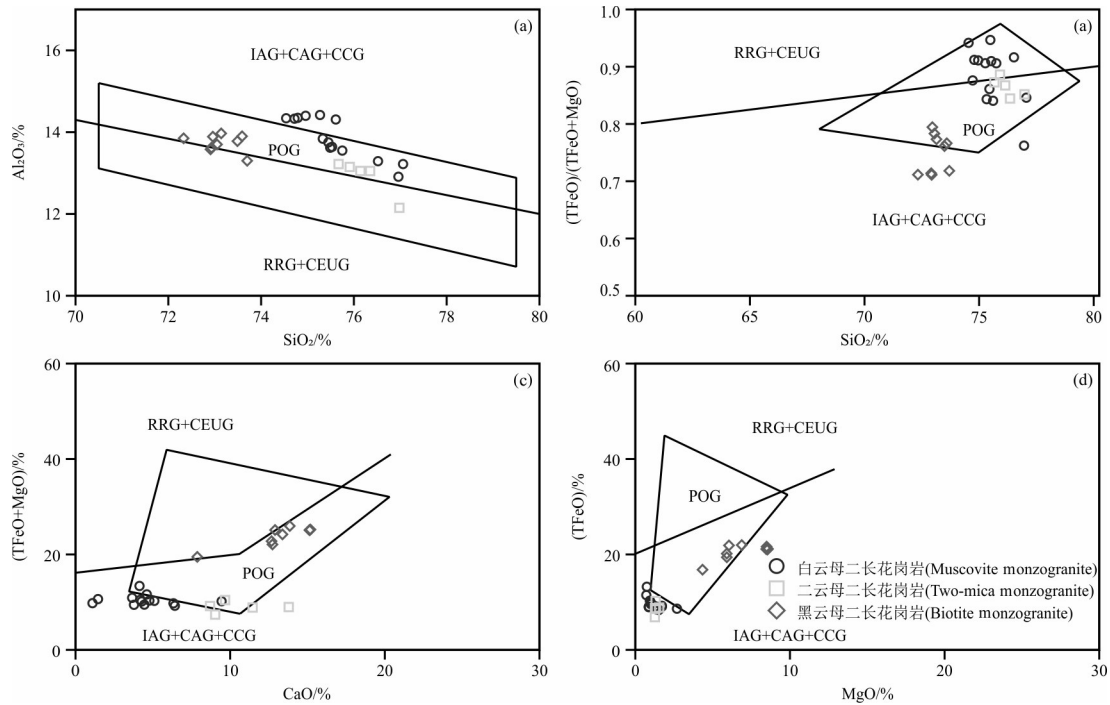


图8 花岗岩构造环境判别图(据 Maniar and Piccoil,1989)

IAG—岛弧花岗岩类; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后造山花岗岩类; RRG—与裂谷有关的花岗岩类; CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

Fig.8 Discriminant diagrams for tectonic setting of granites(after Maniar and Piccoil,1989)

IAG—Island arc granite; CAG—Continental arc granite; CCG—Continental collision granite; POG—Post-orogenic granite; RRG—Rift-related granite; CEUG—Continental epeirogenic uplift granite

(2) 岩石岩相学、主微量元素化学组成特征表明,川口岩体属于过铝质高钾钙碱性系列S型花岗岩,整体表现出大陆碰撞成因的花岗岩类特征。相比二云母二长花岗岩、黑云母二长花岗岩,演化程度较高的赋矿白云母二长花岗岩更有利于钨成矿。

References

- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Liu Yaorong, Wu Guangying, Ma Tieqiu, Wang Xianhui. 2005. Framework of Mesozoic tectonic evolution in southeastern Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area[J]. *Geology in China*, 32(4): 557-570(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Wang Yongqing, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, Zhang Xiaoyang. 2007a. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of the Early Yanshanian peraluminous granites in the Chuankou region, Hengyang, Hunan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 27(2): 49-59(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Zhou Liang, Ma Tieqiu. 2007b. Genesis and tectonic setting of Indosinian granites in southeast Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 197-212(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Ma Tieqiu, Wang Xianhui, Zhang Xiaoyang, Chen Bihe. 2007c. Relationship of petro-geochemical characteristics to metallogenic capacity differences between Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 387-398(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Li Jindong, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, Zhang Xiaoyang, Chen Bihe. 2007d. Important significance of regional tectonic regime to metallogenic capacity of Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan: A case study of Qianlishan and Wangxianling plutons[J]. *Mineral Deposits*, 26(5): 487-500(in Chinese with English abstract).
- Chai Yun, Ma Wen, Zhao Mingfu, Xin Chenghui, Xu Bo, Wang Chengyong, Han Jianjun, Ren Xin. 2019. Geochemical characteristics and geological significance of Late Ordovician Granite in Yangkang Area of Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 52(1): 52-65(in Chinese with English abstract).
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 8: 173-174.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46: 535-551.
- Chappell B W, White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25

- years later[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 48: 489–499.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 6:523–548.
- Li Mengxing. 2019. Zircon U–Pb ages, geochemical characteristics and petrogenesis of the Xishigou complex pluton across the border between Shanxi and Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 55(3):765–778(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 52(9): 981–992(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Li W X, Wang Y J. 2006. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island[J]. The Journal of Geology, 114: 341–353.
- Liu Zhi. 2012. The Study on Ore–controlling Structures of Sanjiaotan Tungsten Deposit at Chuankou in Hunan Province[D]. Central South University(in Chinese with English abstract).
- Maniari P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 101(5): 635–643.
- Ma Dongsheng. 2009. Progress in research on geochemistry of tungsten[J]. Geological Journal of China Universities, 15(1): 19–34 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost Eric A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth–Science Reviews, 37:215–224.
- Peng Nengli, Wang Xianhui, Yang Jun, Chen Di, Luo Lai, Luo Peng, Liu Tianyi. 2017. Re–Os dating of molybdenite from Sanjiaotan tungsten deposit in Chuankou area, Hunan Province, and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 36(6): 1402–1414(in Chinese with English abstract).
- Pichavant M, Montel J M and Richard L R. 1992. Apatite solubility in peraluminous liquids: Experimental data and an extension of the Harrison–Watson model[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56 (10):3855–3861
- Qiu Jiexiang. 1985. Igneous Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 26–37(in Chinese with English abstract).
- Qin Yan, Wang Denghong, Sheng Jifu, Wang Yan. 2019. A review of research achievements on REE geochemistry of tungsten deposits in China[J]. Geology in China, 46(6):1300–1311 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 22: 247–263.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society Special Publication, 42(1):313–345.
- Wang Binhai, Jiang Biguang, Qin Jinning, Li Yunhui, Wang Ka. 2016. Relationship between geochemical characteristics and mineralization of altered rock mass type tungsten deposits in Maowan mining area of Hunan[J]. Mineral Resources and Geology, 30(4): 591–597 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Shen Weizhou. 2003. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 209–220 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Zhang Y H, Fan Weiming, Xi Xianwu, Guo Feng, Lin Ke. 2002. Numerical modeling of the formation of Indo–Sinian peraluminous granitoids in Hunan Province: Basaltic underplating versus tectonic thickening[J]. Science in China(Series D), 45(11): 1042–1056 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yinru. 2012. Research on Ore Genesis and Metallogenic Model of the Sanjiaotan Tungsten Deposit in Chuankou, Hunan[D]. Central South University(in Chinese with English abstract).
- Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanism[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 58:4127–4145.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilder S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003. Highly fractionated I–type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis[J]. Lithos, 66: 241–273.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217–1238(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1554–1569 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan. 2002. The Ways of Investigation on Granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 21–36(in Chinese with English abstract).
- Xia Fei, Chen Junsheng, Wang Xiaona, Lan Hengchun, Nie Fengjun, Song Shizhu, Liu Guoqi. 2017. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating on rhyolites, supergene rhyolite porphyry and diabase of No.278 uranium deposit in Pingyuan county, Guangdong and its geological implications[J]. Geology and Exploration, 53(1): 109–123(in Chinese with English abstract).
- Xiang Anping, Chen Yuchuan, She Hongquan, Li Guangming, Li Yingxu. 2018. Chronology and geochemical characteristics of granite in Weilianhe of Inner Mongolia and its geological significance[J]. Geology in China, 45(5): 963–976(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, Shu Liangshu. 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision–related tectonic system to Yanshanian subduction–related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 16(1): 234–247(in Chinese with English abstract).
- Zheng Ping, Xu Haizhen, Huang Manxiang. 2007. Studies on the genesis and metallogenic model of Yanglin’ao Tungsten deposit, Hengnan, Hunan Province[J]. Mineral Resources and Geology, 21 (2): 126–130(in Chinese with English abstract).

Zheng Ping. 2008. Study on the ore-controlling structure of Yanglin'ao Scheelite Deposit in East Hengyang, Hunan Province[D]. Central South University (in Chinese with English abstract).

Zhu Xinyou, Zhang Zhihui, Fu Xu, Li Baiyang, Wang Yanli, Jiao Shoutao, Sun Yalin. 2016. Geological and geochemical characteristics of the Weilasito Sn-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 43(1):188-208 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

柏道远, 黄建中, 刘耀荣, 伍光英, 马铁球, 王先辉. 2005. 湘东南及湘粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定[J]. *中国地质*, 32(4): 557-570.

柏道远, 汪永清, 王先辉, 马铁球, 张晓阳. 2007a. 湖南衡阳燕山早期川口过铝花岗岩地球化学特征、成因与构造环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 27(2):49-59.

柏道远, 周亮, 马铁球. 2007b. 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(3):197-212.

柏道远, 贾宝华, 马铁球, 王先辉, 张晓阳, 陈必河. 2007c. 湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(5): 387-398.

柏道远, 贾宝华, 李金冬, 王先辉, 马铁球, 张晓阳, 陈必河. 2007d. 区域构造体制对湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力的重要意义:以千里山岩体和王仙岭岩体为例[J]. *矿床地质*, 26(5):487-500.

柴云, 马文, 赵明福, 辛成惠, 徐博, 王成勇, 韩建军, 任鑫. 2019. 青海省阳康地区晚奥陶世花岗岩地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 52(1): 52-65.

李猛兴. 2019. 晋蒙地区西施沟复式岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及岩石成因[J]. *地质与勘探*, 55(3):765-778.

李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 52(9): 981-992.

柳智. 2012. 湖南川口三角潭钨矿床控矿构造研究[D]. 湖南:中南大学.

马东升. 2009. 钨的地球化学研究进展[J]. *高校地质学报*, 15(1):19-34.

彭能立, 王先辉, 杨俊, 陈迪, 罗来, 罗鹏, 刘天一. 2017. 湖南川口三角潭钨矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 36(6):1402-1414.

邱家骧. 1985. 岩浆岩岩石学[M]. 北京:地质出版社, 26-37.

秦燕, 王登红, 盛继福, 王岩. 2019. 中国不同类型钨矿床稀土元素地球化学研究成果综述[J]. *中国地质*, 46(6):1300-1311.

王宾海, 姜必广, 覃金宁, 李云辉, 王卡. 2016. 湖南省毛湾矿区蚀变岩体型钨矿地球化学特征与成矿关系[J]. *矿产与地质*, 30(4): 591-597.

王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. *地质前缘*, 10(3):209-220.

王岳军, Zhang Y H, 范蔚茗, 席先武, 郭锋, 林柯. 2002. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成:岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟[J]. *中国科学(D辑)*, 32(6):491-499.

王银茹. 2012. 湖南省川口三角潭钨矿床成因及成矿模式研究[D]. 湖南:中南大学.

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6):1217-1238.

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 49(16):1589-1640.

肖庆辉, 邓晋福, 马大铨. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京:地质出版社. 21-36.

夏菲, 陈军胜, 王晓娜, 蓝恒春, 聂逢君, 宋世珠, 刘国奇. 2017. 广东平远县 278 铀矿床流纹岩、次流纹岩和辉绿岩 LA-ICP-MS 定年及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 53(1):109-123.

向安平, 陈毓川, 余宏全, 李光明, 李应栩. 2018. 内蒙古苇莲河石英脉型黑钨矿赋矿花岗岩成岩时代、地球化学特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 45(5): 963-976.

张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. *地质前缘*, 16(1):234-247.

郑平, 徐海珍, 黄满湘. 2007. 湖南衡阳杨林坳钨矿床成因与成矿模式研究[J]. *矿产与地质*, 21(2):126-130.

郑平. 2008. 湖南衡阳杨林坳白钨矿床控矿构造研究[D]. 湖南:中南大学.

祝新友, 张志辉, 付旭, 李柏阳, 王艳丽, 焦守涛, 孙雅琳. 2016. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征[J]. *中国地质*, 43(1):188-208.