

# 陕西铜厂闪长岩地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素研究

官相宽, 陈丹玲, 赵皎

(西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 对位于陕西汉中略阳县境内与铜厂铜矿关系密切的闪长岩体进行了地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素研究。地球化学研究表明, 该岩体具有较高的  $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$  和 MgO 含量, 低  $K_2O$  含量, 属低钾钙碱性系列岩石。富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、Th、K、U), 贫高场强元素 (Ti、Nb、Ta、HREE), 低 Sr, 显示壳源成因岩浆岩特征。依据锆石特征及锆石 U-Pb 同位素测年结果确定该岩体形成时代为  $(843.7 \pm 3.8)$  Ma, 属新元古代岩浆作用的产物。锆石 Hf 同位素测试结果显示:  $\epsilon_{Hf}(t)$  介于  $-5.96 \sim -30.17$ , 二阶段模式年龄  $t_{DMC}$  变化范围较大, 介于  $1816 \sim 3344$  Ma, 存在  $1.81 \sim 1.95$  Ga、 $2.13 \sim 2.65$  Ga、 $2.72 \sim 2.78$  Ga、 $2.97 \sim 3.09$  Ga 和  $\sim 3.34$  Ga 5 组年龄峰值, 暗示从新太古代到古元古代, 扬子陆块曾发生过多期地壳增生事件。铜厂闪长岩是在 Rodinia 超大陆裂解过程中, 由这些古老地壳物质部分熔融的结果。闪长岩体中  $2.72 \sim 2.78$  Ga 模式年龄峰值的出现, 表明鱼洞子群的部分基性物质参与了铜厂闪长岩岩浆的形成。

**关键词:** 铜厂闪长岩; 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 碧口群; 基底

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1009-6248(2013)03-0050-14

## Studies on Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Lu-Hf Isotope Composition of the Tongchang Diorites, Shaanxi Province

GONG Xiang-kuan, CHEN Dan-ling, ZHAO Jiao

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** The paper presents geochemistry, Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope of Tongchang diorites, which has a close relationship with the Tongchang Copper Deposit in Shaanxi province. Geochemical studies have shown that the diorites belong to low K calc-alkali rock series, which are characterized by higher  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ , MgO content and lower  $K_2O$  content. The rock is enriched in large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, Ba, Th, U, K, but comparatively depleted in high field strength elements (HFSE) such as Ti, Nb, Ta and HREE. Meanwhile, the content of Sr is low, signifying the characteristics of crustal genesis magmatic rock. According to Zircon features and U-Pb isotopic dating, the rock is formed in a period of  $843.7 \pm 5.5$  Ma, which indicates that it is the product of Neoproterozoic magmatism. Lu-Hf isotope study demonstrates that its  $\epsilon_{Hf}(t)$  is between  $-5.96$  and  $-30.17$ , and the value of  $t_{DM}$  changes greatly from 1816 Ma to 3344 Ma. Moreover, the existence of five groups of age peak (i. e.  $1.81-1.95$ ,  $2.13-2.65$ ,  $2.72-2.78$ ,  $2.97-3.09$  and  $\sim 3.34$  Ga) indicates that the formation of Tongchang diorites is the result of partial melting of ancient crustal rocks in the breaking of Rodinia supercontinent, and these important crustal accretion events of the Yangtze Block occurred from Neoproterozoic to Paleoproterozoic. The emergence of  $2.72-2.78$  Ga model age shows that

收稿日期: 2013-03-18; 修回日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41090374) 资助

作者简介: 官相宽 (1988-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: gongxiangkuan@163.com

partial basic materials from Yudongzi Group may have joined the formation of Tongchang diorites magmatism.

**Key words:** Tongchang diorites; zircon U-Pb aging; zircon Hf isotope; Bikou Group; basement

## 1 引言

铜厂闪长岩体位于“勉略宁”三角地带的陕西略阳县境内,碧口地块之上,与铜厂铜矿的形成关系密切。但有关该岩体的形成时代、成因和形成的构造背景存在争议,直接影响了对杨家坝铁矿和铜矿的深入研究和碧口地块演化的深入探讨。早期利用全岩 Rb-Sr 等时线和蚀变角闪石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法,得到铜厂闪长岩体的形成年龄介于 0.3~1.3 Ga (秦克令等, 1992; 叶霖等, 1997)。新近, 叶霖等(2009)和王伟等(2011)给出的锆石 SHRIMP 年龄分别为 842 Ma 和 879 Ma, 两者相差近 40 Ma。对于该岩体的成因, 目前主要有两种观点, 一种观点认为是晋宁期的岛弧岩浆岩, 与洋壳俯冲作用相关, 由碧口群海相火山岩局部熔融形成(叶霖等, 2009)。但缺少同位素方面的证据, 也与碧口火山岩较小(846~776 Ma, 闫全人等, 2003)的形成时代相矛盾; 另一种观点从该岩体的形成时代出发, 认为铜厂闪长岩体的形成是 Rodinia 超大陆裂解在扬子地台北缘的重要响应(王伟等, 2011)。两种观点给出了截然不同的两种构造背景。另外, 对于碧口地块是否存在古老基底, 目前也存在争论。根据地层之间的不整合关系, 秦克令等(1992)认为碧口群的古老基底为鱼洞子群。但闫全人等(2004)对碧口群火山岩 Nd 同位素研究后发现, 大部分样品的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$ , 提出其母岩浆主要来自地幔源区。已有研究表明, 假如岩浆在形成过程中发生了古老地壳物质和年轻物质的混合, 全岩 Nd 模式年龄反映的不是地壳生长的真实年龄(Kemp et al., 2006)。而且, 岩浆岩锆石 U-Pb 年龄代表的是地壳物质熔融再造的时间, 并不能代表地壳生长的时间。因此, 全岩 Nd 模式年龄并不能有效制约岩浆源区地壳的生长及演化。锆石以其高 Hf、低 Lu, 低 Lu/Hf, 以及高 Hf 同位素体系封闭温度等特点, 在示踪地壳生长和混合岩浆不同端元组分上具有重要意义(Griffin et al., 2002; 郑永飞等, 2007), 可为确定岩石成因提供重要同位素证据。笔者在野外地质考察的基础上, 对铜厂闪长岩进行了系统的岩石学、

地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素研究, 以期准确限定其侵位时代、成因、岩浆源区特征及形成的构造背景, 并为进一步探讨碧口地块基底物质组成和演化提供同位素约束。

## 2 区域地质背景及岩石学特征

铜厂闪长岩体位于陕西汉中略阳县境内, 大地构造位置处于秦岭造山带与扬子地块所夹勉略阳构造三角复合地体中碧口地体与鱼洞子地体拼接带中段靠近碧口地体的一侧, 其北部为鱼洞子群(图 1)。研究区内出露地层以古元古界何家岩岩群、新元古界碧口群郭家沟组和震旦系断头崖组正常沉积碳酸盐岩为主。其中, 何家岩岩群是一套主要由细碧岩和角斑岩组成的变质火山岩, 仅在研究区西南部出露; 郭家沟组地层以海相细碧岩为主, 主要分布于研究区南部, 构成基性火山岩带(王相, 1995), 总体表现出由下到上从基性火山为主向沉积岩为主过渡的特征, 并构成了一个完整的火山喷溢、喷发-沉积旋回(王伟等, 2011)。铜厂闪长岩体产于铜厂火山穹窿中部, 呈北东方向大型岩株产出, 长轴为北东方向, 约 3 200 m。短轴约 1 400 m(叶霖等, 2009)。岩性主要为闪长岩和石英闪长岩, 因遭受蚀变作用, 二者之间接触关系模糊不清(王伟等, 2011)。闪长岩和石英闪长岩沿古火山通道侵入, 岩浆上侵方向为由火山通道上涌后向北东方向推进并侵入郭家沟组细碧岩中, 最终呈椭圆状岩株产出。

笔者研究的闪长岩样品采自铜厂矿区, 地理坐标为 N:33°11'34.0", E:106°20'51.8", 海拔 998 m。岩石呈灰白-浅灰色, 块状构造。造岩矿物以斜长石(60%~70%)、角闪石(15%~20%)为主, 其次为石英(3%~5%)、钾长石(2%~5%)。副矿物主要为磷灰石、锆石和磁铁矿。斜长石呈自形-半自形板状、粒状, 粒径变化于 200~800  $\mu\text{m}$ , 聚片双晶清晰, 部分可见环带结构, 多发生绢云母化。角闪石为自形-半自形柱状, 多色性明显。钾长石呈半自形-他形, 可见纺锤状格子双晶, 多发生高岭土化。石英多呈他形粒状, 可见波状消光(图 2)。

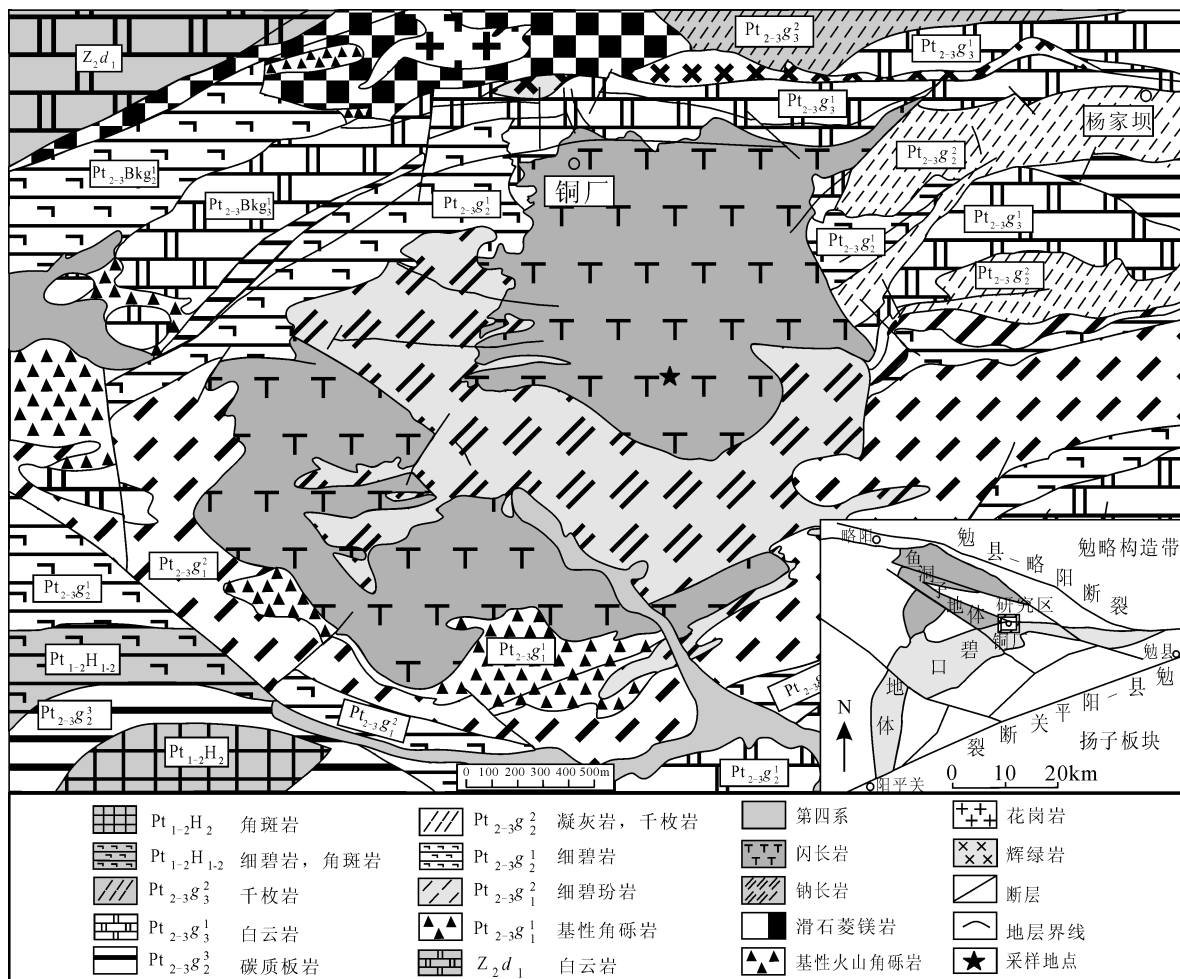


图1 铜厂闪长岩体地质简图 (据略阳县坟家坪-铜厂地区地质图修绘, 2011)

Fig. 1 Geological sketch map of Tongchang diorites

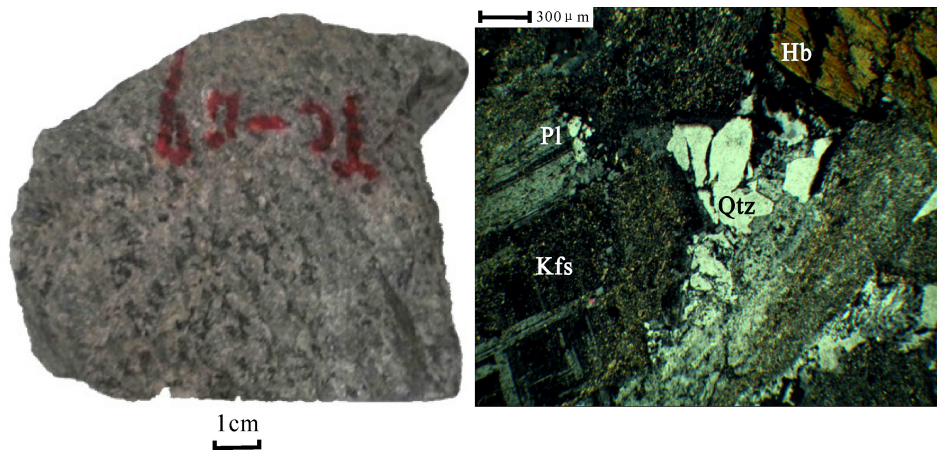


图2 铜厂闪长岩及显微照片

Fig. 2 Photograph and microphotograph of the Tongchang diorite

Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Qtz. 石英; Hb. 角闪石

### 3 分析方法

笔者所涉及的样品分析测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

主量元素采用碱熔玻璃片在日本理学 RIX2100X 荧光光谱仪上分析获得, 经 BCR-2 和 GBM07105 标样以及重复样监控, 分析精度一般优于 2%, 烧失量采用湿法化学法分析获得。微量元素和稀土元素含量经酸溶后采用 LA-ICP-MS 测定。锆石 CL 图像采集由加载在扫描电镜上的英国 Gatan 公司的 Mono CL<sup>3+</sup> 型阴极荧光探头完成。U-Pb 同位素测定采用 LA-ICP-MS 进行, 数据处理采用 GLITTER (Ver4.0) 程序, 年龄计算以标准锆石 91 500 和 GJ-1 为外标进行同位素比值分馏校正。元素浓度的计算采用 NIST610 作外标, Si 作内标。U-Pb 谐和图采用 ISOPLOT 程序 (Ver 3.0) 获得。锆石 Lu-Hf 同位素分析采用配备 193 nm 激光 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪进行分析, 分析过程中采用 8Hz 的激光频率、100 mJ 的激光强度和 30  $\mu$ m 的激光束斑直径, 以 He 作为剥蚀物质的载气, 采用标准锆石 91 500 做外部标样。Hf 同位素测定采用 <sup>176</sup>Lu/<sup>175</sup>Lu = 0.026 69 和 <sup>176</sup>Yb/<sup>172</sup>Yb = 0.588 6 进行同量异位干

扰校正测定样品的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 和 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值。Hf 二阶段模式年龄 ( $t_{DMC}$ ) 计算采用上地壳平均成分 (0.008) 计算, 详细分析步骤及数据处理方法见 Yuan (2004, 2008)。

### 4 结果

#### 4.1 岩石地球化学

铜厂闪长岩 SiO<sub>2</sub> = 58.79% ~ 66.87%, 平均 62.62%, TiO<sub>2</sub> = 0.43% ~ 0.81%; MgO = 1.86% ~ 3.72%, Mg<sup>#</sup> = 49.5 ~ 54, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 13.74% ~ 16.52%, 平均 15.47%。铝饱和指数 (A/CNK) 介于 2.01 ~ 2.40, 属准铝质-弱过铝质系列 (图 3-a)。Na<sub>2</sub>O = 3.97% ~ 5.86%, 平均 4.98%。K<sub>2</sub>O = 0.94% ~ 3.17%, 平均 1.83%。Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O = 1.25 ~ 6.23。在 SiO<sub>2</sub>-(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O) 图解中, 样品点主要落入闪长岩和石英闪长岩区域 (图 4)。岩石的里特曼指数  $\sigma$  介于 2.04 ~ 3.23, 平均 2.39, 属钙碱性系列。在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解中 (图 3-b), 样品点也主要落入钙碱性系列范围, 属低钾钙碱性系列岩石。在氧化物 Haker 图解中, TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 存在负相关关系, 而 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO 与 SiO<sub>2</sub> 不显示明显的线性相关关系, 说明该闪长岩体不存在明显的结晶分异作用。

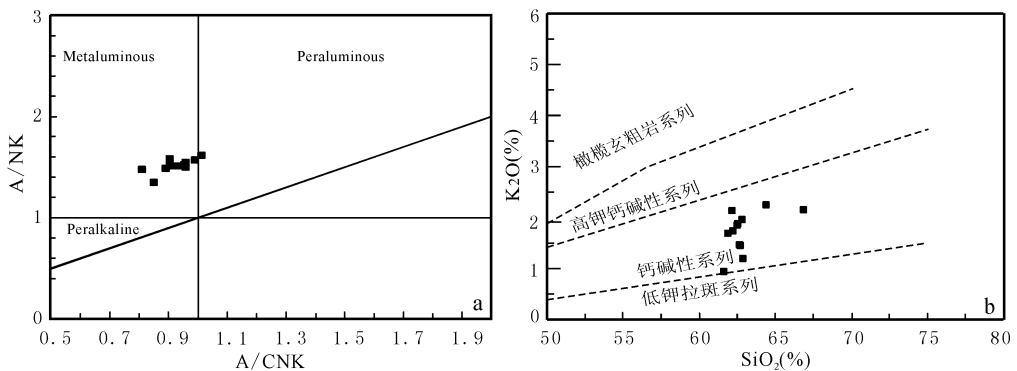


图3 铜厂闪长岩 A/CNK-A/NK 图解 (a) 与 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解 (b)

Fig. 3 A/CNK-A/NK diagram (a) and SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram (b) of the Tongchang diorite

Metaluminous. 准铝质; Peraluminous. 过铝质; Peralkaline. 过碱质

岩石的稀土总量较高,  $\Sigma$ REE =  $91.9 \times 10^{-6}$  ~  $135 \times 10^{-6}$ , 平均  $108.57 \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化稀土配分图解中 (图 5-a), 所有样品都表现出轻稀土元素 (LREE) 富集的右倾型曲线形态, (La/

Yb)<sub>N</sub> 值介于 5.35 ~ 11.7。轻稀土分馏明显 ((La/Sm)<sub>N</sub> = 3.69)。重稀土相对平坦 ((Gd/Yb)<sub>N</sub> = 1.46)。除样品 TC-06 显示为正 Eu 异常, 可能与斜长石的堆晶作用有关外, 其余样品的  $\delta$ Eu 值变化

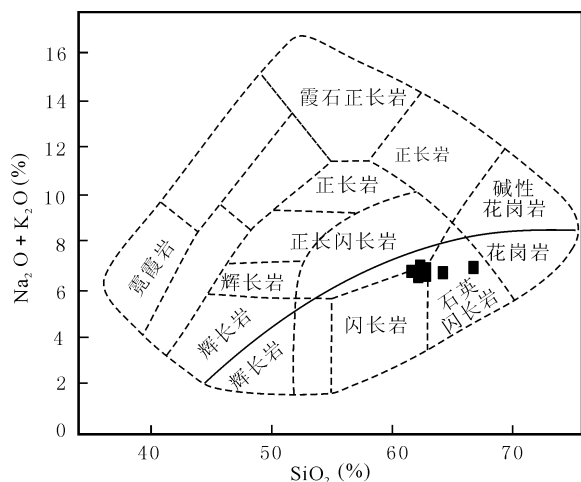


图4 铜厂闪长岩  $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  图解

Fig. 4  $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  diagram of the Tongchang diorite

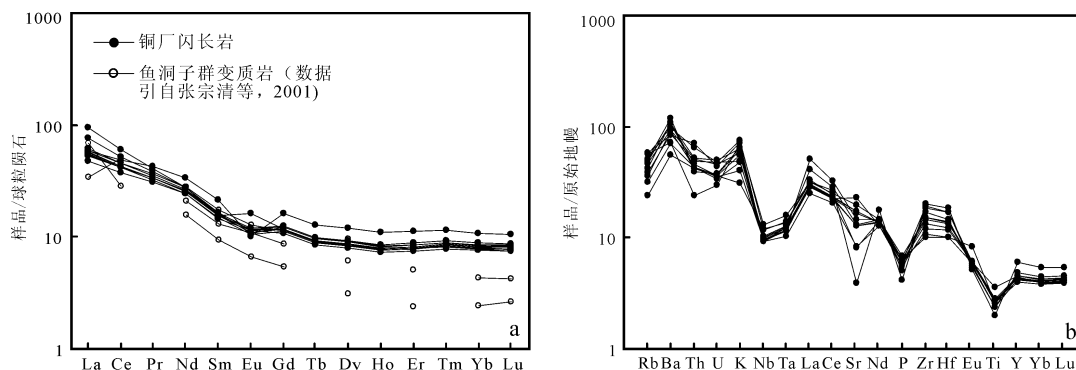


图5 铜厂闪长岩稀土元素配分图 (a) 及微量元素蛛网图 (b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern (a) and trace elements pattern (b) of the Tongchang diorite

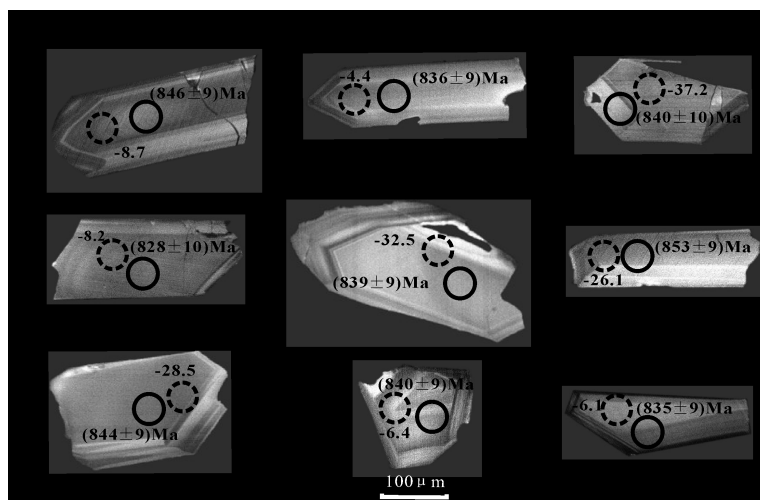


图6 铜厂闪长岩锆石 CL 图像

Fig. 6 Cathodoluminescence image of analyzed zircons of the Tongchang diorite

(实线圆代表锆石 U-Pb 年龄; 虚线圆代表  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值)

于 0.53~0.92, 岩石总体 Ce 异常不明显 ( $\delta\text{Ce} = 0.89 \sim 0.96$ )。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上 (图 5-b), 所有样品的分布趋势基本一致, 相对富集 LREE、Rb、Ba、Th、U 和 K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等高场强元素, 具有较明显的 Sr 负异常 (表 1)。

#### 4.2 锆石 U-Pb 同位素定年

闪长岩锆石无色透明, 多呈自形柱状形态, 长轴变化于 200~500  $\mu\text{m}$ , 并显示较宽的岩浆振荡环带结构 (图 6)。借助激光拉曼光谱分析, 发现锆石中含大量针状或棒状石英、磷灰石、假象赤铁矿等原生矿物包裹体。锆石的 Th 和 U 含量分别变化于  $23.2 \times 10^{-6} \sim 113.38 \times 10^{-6}$  和  $40.54 \times 10^{-6} \sim 147.4 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.37~0.81, 并显示轻

表 1 铜厂闪长岩主、微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 含量Tab. 1 The contents of major and trace ( $\times 10^{-6}$ ) elements in the Tongchang diorites

项目	TC-01	TC-02	TC-03	TC-04	TC-05	TC-06	TC-07	TC-08	TC-09	TC-10	TC-11	TC-12
SiO <sub>2</sub>	62.48	62.63	62.81	61.64	62.71	62.89	61.88	62.53	62.20	66.87	62.16	64.41
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.57	0.59	0.77	0.59	0.56	0.56	0.57	0.61	0.43	0.51	0.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.74	15.63	15.60	15.77	15.54	15.52	16.13	15.97	15.56	13.74	14.15	15.27
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.11	6.07	5.82	6.48	6.15	6.20	5.90	6.32	6.69	3.44	5.83	4.42
MnO	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.08	0.05
MgO	3.08	2.67	2.85	2.99	3.03	2.93	2.68	2.86	3.05	2.20	2.82	1.86
CaO	3.25	3.55	3.32	3.86	3.78	3.49	4.14	3.22	3.13	3.23	4.34	3.31
Na <sub>2</sub> O	5.17	5.33	4.95	5.86	5.31	5.47	5.14	4.77	4.92	4.83	4.43	4.53
K <sub>2</sub> O	1.85	1.46	1.95	0.94	1.45	1.20	1.68	1.88	1.74	2.15	2.13	2.25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.12	0.13	0.15	0.14	0.13	0.13	0.13	0.14	0.09	0.12	0.11
LOI	1.74	1.98	1.91	1.54	1.46	1.63	1.58	1.67	1.95	3.13	3.37	3.55
TOTAL	100.22	100.08	99.99	100.07	100.23	100.08	99.88	99.99	100.06	100.17	99.94	100.27
V	108	106	111	121	113	110	107	107	113	56.8	100	78.4
Cr	17.9	21.1	20.0	19.3	19.6	20.7	15.7	17.1	17.8	8.32	16.3	11.5
Co	62.7	64.5	76.3	61.6	77.4	73.3	64.6	55.9	65.1	108	83.4	53.8
Ni	11.1	12.6	11.2	11.0	10.4	12.0	9.75	10.1	10.8	5.04	9.55	6.85
Rb	31.0	24.3	32.5	15.2	23.1	19.9	26.4	31.6	29.3	36.5	35.8	36.3
Sr	267	347	269	414	363	367	480	310	278	82.0	174	170
Y	19.9	19.0	20.6	20.8	19.6	20.1	18.3	19.7	20.8	27.1	19.3	21.8
Zr	170	135	151	171	114	120	163	217	170	226	188	207
Nb	7.07	6.57	6.94	8.59	7.18	6.78	6.67	6.75	7.38	9.22	6.57	8.28
Cs	1.00	0.83	1.05	0.44	0.72	0.62	0.83	1.06	0.95	0.55	0.62	0.99
Ba	734	591	818	390	643	487	759	737	644	584	505	676
La	19.8	19.9	19.6	21.8	20.7	21.0	20.4	35.0	28.2	21.8	17.3	22.7
Ce	40.3	39.8	40.2	44.0	40.7	41.3	39.7	57.6	50.2	47.0	36.2	43.7
Pr	4.65	4.59	4.66	5.00	4.63	4.66	4.42	5.55	5.22	5.80	4.27	4.85
Nd	18.4	18.3	18.7	19.7	18.3	18.4	17.2	19.8	19.5	24.1	17.5	19.1
Sm	3.62	3.62	3.78	3.84	3.65	3.61	3.33	3.56	3.73	4.96	3.46	3.75
Eu	0.96	1.01	1.03	1.01	0.99	1.40	1.00	1.01	1.04	0.87	0.91	0.94
Gd	3.59	3.56	3.79	3.80	3.60	3.60	3.30	3.49	3.73	4.97	3.42	3.76
Tb	0.54	0.53	0.57	0.57	0.54	0.54	0.49	0.52	0.56	0.75	0.51	0.56
Dy	3.31	3.21	3.45	3.51	3.29	3.26	3.04	3.18	3.44	4.60	3.17	3.52
Ho	0.68	0.65	0.71	0.71	0.67	0.66	0.62	0.66	0.70	0.93	0.65	0.73
Er	2.03	1.96	2.11	2.12	1.99	1.96	1.86	1.99	2.10	2.77	1.94	2.19
Tm	0.31	0.29	0.31	0.31	0.30	0.29	0.27	0.30	0.31	0.41	0.29	0.33
Yb	2.02	1.95	2.06	2.09	1.96	1.91	1.89	2.02	2.10	2.67	1.97	2.18
Lu	0.31	0.30	0.31	0.32	0.30	0.29	0.29	0.32	0.32	0.40	0.30	0.33
Hf	4.22	3.60	3.81	4.28	3.12	3.11	4.08	5.25	4.22	5.68	4.48	5.18
Ta	0.51	0.48	0.48	0.56	0.52	0.50	0.47	0.49	0.53	0.65	0.42	0.57
Th	3.61	4.11	3.32	3.55	3.65	3.66	3.85	4.38	4.33	5.91	2.04	5.46
U	0.77	0.99	0.79	0.76	0.71	0.75	0.76	1.06	0.96	0.91	0.62	1.00

注：主量元素含量为%，微量元素含量为 $\times 10^{-6}$ 。

稀土亏损、重稀土明显富集，具有明显的正 Ce 异常和负 Eu 异常的典型岩浆成因锆石特征（图 7-a）。对 20 个锆石颗粒 23 个测点的 U-Th-Pb 分析结果见表 2。在 U-Pb 谐和图上（图 7），所有测点在谐和线上及其附近形成一个年龄聚集区， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(843.7 \pm 3.8)$  Ma

( $1\sigma$ , MSWD=0.92)。

#### 4.3 锆石 Hf 同位素组成

闪长岩锆石原位 Hf 同位素分析结果见表 3。其中， $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值变化于 0.000 6~0.002，平均为 0.001 5，表明锆石在形成后放射成因 Hf 的积累较少，所测  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值可以代表其形成时体系

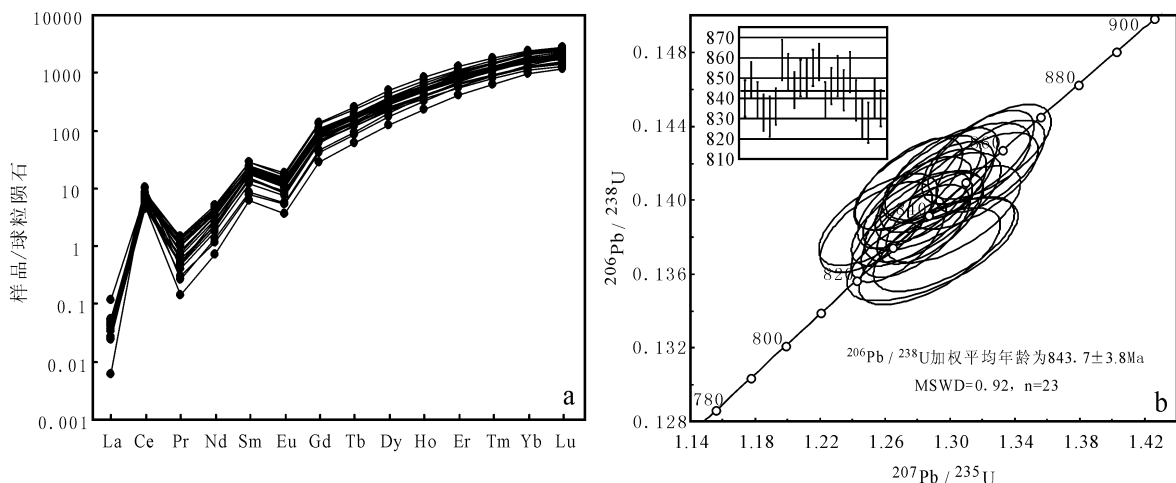


图 7 铜厂闪长岩锆石 REE 配分图解 (a) 和 U-Pb 谐和图 (b)

Fig. 7 Chondrite normalized REE pattern (a) and U-Pb concordia diagram (b) for zircons of Tongchang diorite

表 2 铜厂闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Tab. 2 LA-ICP-MS U-Pb analysis result of zircons from the Tongchang diorites

点号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$
TC-01	0.066 9	0.001 7	1.283 8	0.024 0	0.139 1	0.001 6	0.040 7	0.000 6	834.0	20.0	839.0	11.0	840.0	9.0	806.0	11.0
TC-02	0.066 6	0.001 6	1.292 0	0.023 2	0.140 7	0.001 6	0.042 6	0.000 5	824.0	19.0	842.0	10.0	849.0	9.0	844.0	10.0
TC-03	0.065 5	0.001 7	1.255 9	0.024 2	0.139 0	0.001 6	0.043 5	0.000 6	791.0	22.0	826.0	11.0	839.0	9.0	861.0	11.0
TC-04	0.066 7	0.001 5	1.268 4	0.019 3	0.137 9	0.001 6	0.043 1	0.000 5	827.0	15.0	832.0	9.0	833.0	9.0	854.0	9.0
TC-05	0.068 3	0.001 9	1.296 4	0.028 7	0.137 6	0.001 7	0.045 8	0.000 8	877.0	26.0	844.0	13.0	831.0	10.0	905.0	15.0
TC-06	0.065 7	0.001 6	1.254 7	0.022 8	0.138 6	0.001 6	0.043 4	0.000 5	796.0	20.0	826.0	10.0	836.0	9.0	859.0	10.0
TC-07	0.067 3	0.001 7	1.324 5	0.025 0	0.142 6	0.001 7	0.045 4	0.000 6	848.0	21.0	856.0	11.0	859.0	10.0	897.0	11.0
TC-08	0.066 4	0.001 6	1.294 8	0.022 9	0.141 4	0.001 7	0.043 7	0.000 5	818.0	19.0	843.0	10.0	853.0	9.0	864.0	10.0
TC-09	0.066 3	0.001 6	1.278 2	0.023 1	0.139 9	0.001 6	0.044 1	0.000 5	815.0	20.0	836.0	10.0	844.0	9.0	872.0	10.0
TC-10	0.065 6	0.001 6	1.274 8	0.021 8	0.140 9	0.001 6	0.044 4	0.000 5	794.0	18.0	835.0	10.0	850.0	9.0	878.0	10.0
TC-11	0.065 9	0.001 7	1.280 1	0.025 8	0.141 0	0.001 7	0.042 4	0.000 6	802.0	23.0	837.0	11.0	850.0	10.0	839.0	11.0
TC-12	0.067 7	0.001 6	1.324 8	0.022 2	0.141 8	0.001 7	0.044 5	0.000 5	861.0	17.0	857.0	10.0	855.0	9.0	880.0	10.0
TC-13	0.067 1	0.001 6	1.317 3	0.022 8	0.142 3	0.001 7	0.044 0	0.000 5	842.0	18.0	853.0	10.0	858.0	9.0	871.0	10.0
TC-14	0.067 2	0.001 6	1.287 9	0.021 6	0.139 0	0.001 6	0.043 4	0.000 5	844.0	17.0	840.0	10.0	839.0	9.0	858.0	10.0
TC-15	0.066 6	0.001 6	1.288 2	0.022 7	0.140 3	0.001 7	0.042 3	0.000 5	826.0	19.0	840.0	10.0	846.0	9.0	838.0	10.0
TC-16	0.067 6	0.001 8	1.314 3	0.026 5	0.141 1	0.001 7	0.043 9	0.000 6	856.0	23.0	852.0	12.0	851.0	10.0	868.0	11.0
TC-17	0.066 8	0.001 8	1.289 0	0.028 1	0.139 9	0.001 7	0.042 8	0.000 6	832.0	25.0	841.0	12.0	844.0	10.0	847.0	12.0
TC-18	0.066 9	0.001 9	1.304 0	0.030 0	0.141 5	0.001 8	0.042 4	0.000 6	833.0	27.0	847.0	13.0	853.0	10.0	839.0	12.0
TC-19	0.066 6	0.001 7	1.276 6	0.024 5	0.139 0	0.001 7	0.043 8	0.000 6	827.0	21.0	835.0	11.0	839.0	10.0	867.0	11.0
TC-20	0.068 1	0.002 2	1.289 3	0.034 8	0.137 3	0.001 8	0.041 8	0.000 7	872.0	34.0	841.0	15.0	830.0	10.0	827.0	14.0
TC-21	0.068 2	0.001 9	1.287 4	0.028 8	0.137 0	0.001 7	0.040 2	0.000 6	874.0	26.0	840.0	13.0	828.0	10.0	796.0	11.0
TC-22	0.067 8	0.001 8	1.302 1	0.027 4	0.139 2	0.001 7	0.041 7	0.000 7	864.0	24.0	847.0	12.0	840.0	10.0	826.0	14.0
TC-23	0.067 1	0.001 6	1.279 0	0.022 1	0.138 3	0.001 7	0.042 2	0.000 6	840.0	18.0	836.0	10.0	835.0	9.0	835.0	11.0

表 3 铜厂闪长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Tab. 3 The zircon Hf analysis result of the Tongchang diorites

点号	<i>t</i> (Ma)	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	2σ	ε <sub>Hf</sub> (0)	ε <sub>Hf</sub> ( <i>t</i> )	2σ	<i>t</i> <sub>DM</sub> (Hf)	<i>t</i> <sub>DM</sub> (C)	<i>f</i> <sub>Lu/Hf</sub>
TC-01-01	843.7	0.040 784	0.001 567	0.281 356	0.000 015	-50.08	-32.38	0.52	2 688.93	3 079.42	-0.95
TC-01-02	843.7	0.050 196	0.001 927	0.281 203	0.000 015	-55.48	-37.99	0.52	2 927.71	3 344.02	-0.94
TC-01-03	843.7	0.020 051	0.000 824	0.281 612	0.000 012	-41.03	-22.89	0.42	2 288.05	2 628.98	-0.98
TC-01-04	843.7	0.036 758	0.001 409	0.281 420	0.000 015	-47.80	-30.00	0.52	2 588.53	2 966.83	-0.96
TC-01-05	843.7	0.035 172	0.001 348	0.281 534	0.000 014	-43.79	-25.95	0.50	2 427.85	2 774.49	-0.96
TC-01-06	843.7	0.041 287	0.001 579	0.281 350	0.000 013	-50.29	-32.60	0.47	2 697.91	3 089.53	-0.95
TC-01-07	843.7	0.042 011	0.001 597	0.281 529	0.000 013	-43.96	-26.26	0.47	2 450.43	2 788.84	-0.95
TC-01-08	843.7	0.048 140	0.001 835	0.281 535	0.000 015	-43.75	-26.18	0.54	2 457.70	2 785.03	-0.94
TC-01-09	843.7	0.037 640	0.001 447	0.281 610	0.000 014	-41.09	-23.31	0.49	2 328.26	2 648.25	-0.96
TC-01-10	843.7	0.044 414	0.001 688	0.281 573	0.000 014	-42.40	-24.75	0.49	2 395.02	2 717.13	-0.95
TC-01-11	843.7	0.034 654	0.001 306	0.282 019	0.000 016	-26.64	-8.75	0.55	1 750.97	1 950.75	-0.96
TC-01-12	843.7	0.042 410	0.001 733	0.282 026	0.000 015	-26.39	-8.74	0.55	1 760.94	1 950.03	-0.95
TC-01-13	843.7	0.026 050	0.000 997	0.282 093	0.000 014	-24.03	-5.96	0.50	1 634.16	1 816.26	-0.97
TC-01-14	843.7	0.032 733	0.001 270	0.282 043	0.000 015	-25.77	-7.86	0.54	1 715.05	1 907.95	-0.96
TC-01-15	843.7	0.027 448	0.001 048	0.282 068	0.000 014	-24.91	-6.87	0.50	1 671.02	1 860.22	-0.97
TC-01-16	843.7	0.033 916	0.001 367	0.282 088	0.000 015	-24.17	-6.31	0.54	1 655.94	1 833.16	-0.96
TC-01-17	843.7	0.041 265	0.001 611	0.282 066	0.000 014	-24.97	-7.24	0.50	1 698.42	1 878.06	-0.95
TC-01-18	843.7	0.035 599	0.001 416	0.281 773	0.000 007	-35.33	-17.52	0.25	2 099.82	2 371.85	-0.96
TC-01-19	843.7	0.031 995	0.001 290	0.281 793	0.000 008	-34.62	-16.73	0.30	2 064.84	2 334.36	-0.96
TC-01-20	843.7	0.042 305	0.001 688	0.281 676	0.000 010	-38.77	-21.12	0.37	2 251.49	2 543.81	-0.95
TC-01-21	843.7	0.041 519	0.001 654	0.281 736	0.000 008	-36.63	-18.95	0.27	2 164.53	2 440.25	-0.95
TC-01-22	843.7	0.038 956	0.001 566	0.281 702	0.000 009	-37.84	-20.11	0.32	2 207.21	2 495.78	-0.95
TC-01-23	843.7	0.045 588	0.001 816	0.281 539	0.000 009	-43.60	-26.02	0.33	2 450.51	2 777.36	-0.95
TC-01-24	843.7	0.039 557	0.001 579	0.281 724	0.000 009	-37.06	-19.34	0.31	2 177.32	2 459.03	-0.95
TC-01-25	843.7	0.039 920	0.001 618	0.281 751	0.000 009	-36.09	-18.40	0.33	2 141.36	2 413.78	-0.95
TC-01-26	843.7	0.047 163	0.001 911	0.281 637	0.000 011	-40.15	-22.62	0.38	2 319.81	2 615.47	-0.94
TC-01-27	843.7	0.041 796	0.001 662	0.281 615	0.000 009	-40.90	-23.24	0.33	2 334.20	2 644.97	-0.95
TC-01-28	843.7	0.034 981	0.001 393	0.281 786	0.000 009	-34.89	-17.06	0.31	2 080.93	2 349.83	-0.96
TC-01-29	843.7	0.034 095	0.001 374	0.281 745	0.000 009	-36.31	-18.48	0.31	2 136.01	2 417.66	-0.96
TC-01-30	843.7	0.038 105	0.001 560	0.281 789	0.000 008	-34.76	-17.02	0.29	2 085.14	2 348.13	-0.95
TC-01-31	843.7	0.042 083	0.001 741	0.281 660	0.000 009	-39.34	-21.71	0.31	2 277.02	2 572.12	-0.95
TC-01-32	843.7	0.038 807	0.001 686	0.281 744	0.000 008	-36.35	-18.69	0.28	2 155.22	2 427.63	-0.95
TC-01-33	843.7	0.036 940	0.001 471	0.281 822	0.000 011	-33.58	-15.80	0.39	2 033.85	2 289.47	-0.96
TC-01-34	843.7	0.040 533	0.001 606	0.281 727	0.000 009	-36.96	-19.26	0.33	2 175.09	2 455.13	-0.95
TC-01-35	843.7	0.025 709	0.001 049	0.281 856	0.000 009	-32.40	-14.38	0.32	1 965.07	2 221.48	-0.97
TC-01-36	843.7	0.040 921	0.001 628	0.281 771	0.000 009	-35.39	-17.70	0.33	2 114.08	2 380.38	-0.95
TC-01-37	843.7	0.048 190	0.001 913	0.281 628	0.000 011	-40.47	-22.95	0.38	2 332.64	2 630.79	-0.94
TC-01-38	843.7	0.029 616	0.001 189	0.281 830	0.000 008	-33.33	-15.39	0.30	2 008.77	2 269.79	-0.96
TC-01-39	843.7	0.039 172	0.001 565	0.281 799	0.000 010	-34.42	-16.69	0.34	2 072.08	2 332.08	-0.95
TC-01-40	843.7	0.041 225	0.001 638	0.281 711	0.000 009	-37.52	-19.83	0.32	2 198.75	2 482.34	-0.95
TC-01-41	843.7	0.032 789	0.001 307	0.281 771	0.000 009	-35.40	-17.53	0.31	2 096.55	2 372.39	-0.96
TC-01-42	843.7	0.040 124	0.001 603	0.281 641	0.000 007	-40.01	-22.31	0.26	2 295.13	2 600.55	-0.95
TC-01-43	843.7	0.041 558	0.001 656	0.281 694	0.000 008	-38.12	-20.44	0.29	2 223.61	2 511.59	-0.95
TC-01-44	843.7	0.014 892	0.000 626	0.281 903	0.000 007	-30.73	-12.46	0.26	1 878.59	2 129.64	-0.98

的 Hf 同位素组成。样品的  $f_{Lu/Hf}$  为  $-0.98 \sim -0.94$ ，平均为  $-0.95$ ，明显小于镁铁质及硅铝质地壳的  $f_{Lu/Hf}$  值（分别为  $-0.34$  和  $-0.72$ ），故其二阶段模式年龄更能反映源区物质从亏损地幔被抽

取的时间或源区物质在地壳的平均存留年龄 (Vervoort et al., 1996)。

从表 3 可以看出，锆石 Lu-Hf 同位素组成变化范围较大， $^{176}Hf/^{177}Hf$  值变化于  $0.281\ 203 \sim$



0.282 092, 按岩体结晶年龄  $t = 843.7 \text{ Ma}$  计算, 得到锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于  $-5.96 \sim -37.99$ , 揭示岩浆来自于地壳岩石的部分熔融。锆石的二阶段模式年龄介于  $1\ 816 \sim 3\ 344 \text{ Ma}$ 。在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$  图解 (图 8-a) 中, 所有数据点均落于球粒陨石演化线之

下, 但变化范围较大。在模式年龄累计频率图中 (图 8-b), 大致存在  $1.82 \sim 1.95 \text{ Ga}$ 、 $2.13 \sim 2.65 \text{ Ga}$ 、 $2.72 \sim 2.78 \text{ Ga}$ 、 $2.97 \sim 3.09 \text{ Ga}$  和  $\sim 3.34 \text{ Ga}$  5 组年龄峰值, 它们可能对应着不同时期的幕式岩浆事件, 暗示太古宙至古元古代扬子陆块发生过多

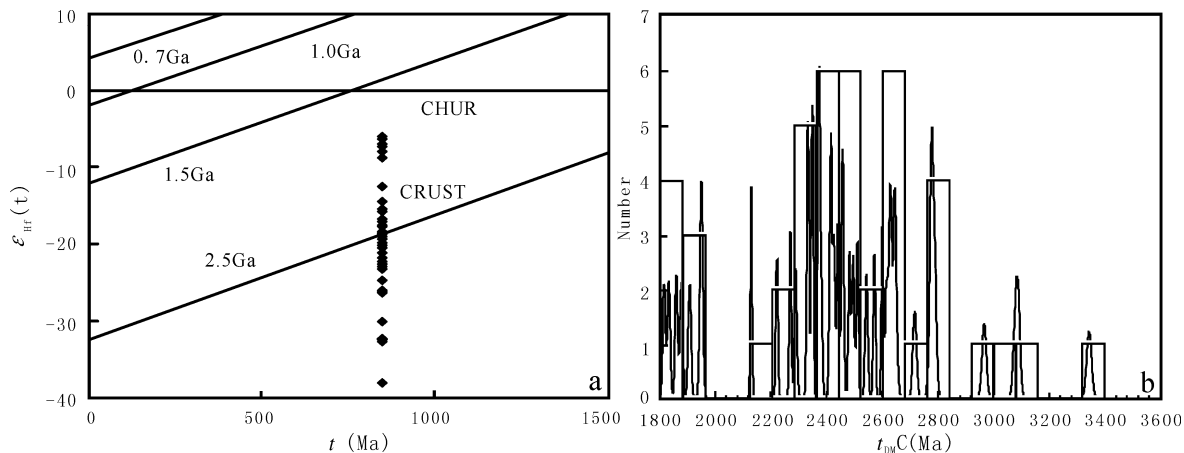


图 8 铜厂闪长岩锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$  图解 (a) 及  $t_{\text{DM C}}$  概率分布图 (b)

Fig. 8  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - t$  diagram (a) and the frequency of  $t_{\text{DM C}}$  (b) from zircons of the Tongchang diorite

次地壳增生事件。

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

实验岩石学研究表明, 地幔橄榄岩部分熔融只可能产生玄武质或玄武安山质岩浆, 而不能直接产生英质岩浆 (Wyllie, 1979)。因此, 一般认为, 闪长岩的形成主要存在玄武质岩浆在低压下分离结晶 (Gill, 1981)、壳幔混合 (Xu et al., 1999) 以及下地壳玄武质岩石的部分熔融 (Spulber et al., 1983; Beard et al., 1989) 等三种成因。铜厂闪长岩属准铝质-弱过铝质、低钾-钙碱性岩石系列。以富集大离子亲石元素、贫高场强元素为特征, 显示典型壳源成因花岗质岩石特征。Nd =  $17.2 \times 10^{-6} \sim 24.1 \times 10^{-6}$ , Nb =  $6.57 \times 10^{-6} \sim 9.22 \times 10^{-6}$ , Ta =  $0.42 \times 10^{-6} \sim 0.65 \times 10^{-6}$ , Th =  $2.01 \times 10^{-6} \sim 5.91 \times 10^{-6}$ , Nd/Th =  $3.49 \sim 5.62$ , Nb/Ta =  $13.56 \sim 15.66$ , 都明显低于幔源岩石 (Nd/Th > 15, Nb/Ta  $\approx 22$ , Bea et al., 2001) 而稍高于壳源岩石 (Nd/Th  $\approx 3$ , Nb/Ta  $\approx 12$ , Bea et al., 2001) 的相应比值, 显示壳幔混合的特点。岩石的

Ti =  $2\ 577 \times 10^{-6} \sim 4\ 615 \times 10^{-6}$ , Zr =  $114 \times 10^{-6} \sim 226 \times 10^{-6}$ , Y =  $18.3 \sim 27.1 \times 10^{-6}$ , Ti/Zr (11.43 ~ 31.15) 和 Ti/Y (95.02 ~ 221.88, 平均值为 169.01) 值均与地壳相同元素比值相近 (Ti/Zr < 30, Ti/Y < 200, Wedepohl, 1995), 表明铜厂闪长岩岩浆应以壳源为主。

前人根据闪长岩和碧口火山岩具有相似的稀土元素组成特征, 提出铜厂闪长岩是由碧口群火山岩局部熔融形成 (叶霖等, 2009)。碧口群虽然广泛发育基性熔岩, 但最新的年代学研究给出其形成年龄介于  $846 \sim 776 \text{ Ma}$  (闫全人等, 2003; 赖绍聪, 2007), 该年龄与前人及笔者所获得的闪长岩  $840 \sim 879 \text{ Ma}$  (叶霖等, 2009; 王伟等, 2011) 的结晶年龄相近或稍晚。而且, 闪长岩如此大的规模也不可能用玄武质岩浆分离结晶的结果来解释 (李曙光等, 1997)。另外, 闪长岩中锆石明显低的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 ( $-5.96 \sim -37.99$ ), 以及远大于结晶年龄的 Hf 模式年龄 ( $1\ 816 \sim 3\ 344 \text{ Ma}$ ) 的获得, 均表明岩浆主要来源于古老地壳物质的部分熔融。

铜厂闪长岩锆石 Hf 同位素组成在较大的范围内变化, 表明岩浆源区物质组成复杂, 多个模式年

龄峰值的获得也不支持铜厂闪长岩是新元古代碧口群火山岩局部熔融结果的认识(叶霖等, 2009)。

## 5.2 构造背景

岩石地球化学及锆石 Hf 同位素组成特征表明, 铜厂闪长岩岩浆主要来自下地壳玄武质岩石的部分熔融。但是单纯由下地壳基性岩发生部分熔融形成规模较大深成岩体需要相当高的热流, 绝大部分地区的下地壳并不具备此条件(韩庆军等, 2000)。已有研究认为, 扬子陆块做为小型陆块被包裹在格林威尔造山带之中参与了中元古代晚期(距今 1 300~900 Ma) 罗迪尼亚超大陆的聚合过程(郭进京等, 1999; 郝杰等, 2002)。在 Rodinia 超大陆完全拼合后的 40~60 Ma, 由于停止俯冲的板片拆沉, 地幔物质发生上涌, 造成岩浆源区形成高热流值, 诱导扬子陆块地壳物质部分熔融形成长英质岩浆。铜厂闪长岩 843 Ma 锆石 U-Pb 年龄的获得, 也与 Rodinia 超大陆发生裂解的时代相一致。

铜厂闪长岩侵位于碧口群之中。碧口群主要分布于扬子地块北缘、秦岭造山带南侧, 分布面积约近万平方千米, 一般被认为形成于大陆板内裂谷环境(夏林圻等, 1996a, 1996b, 2007; 丁振举等, 1998; 李永飞等, 2007; 徐学义等, 2001)。也有学者认为其形成于岛弧(裴先治, 1989; 秦克令等, 1994; 闫全人等, 2004)、洋中脊和(或)大洋板内环境(张二朋等, 1993; 刘国惠等, 1993)。碧口群发育典型双峰式火山岩组合, 由基性火山岩(细碧岩及细碧质凝灰岩)及酸性火山岩(石英角斑岩及石英角斑质凝灰岩)组成, 且基性火山岩与酸性火山岩均很发育。而且, 火山凝灰岩在碧口群普遍发育, 也说明火山岩浆是以喷溢和爆发作用为主, 并非深海环境下的产物(夏祖春等, 1999)。此外, 碧口群火山岩系分布面积广、双峰式火山岩组合发育等特征与高火山活动型(HV型: high-volcanicity)裂谷火山岩系特征相同(Barberi et al, 1982)。这说明与铜厂闪长岩体同时代或稍晚的新元古代碧口群火山岩形成于快速拉张的大陆裂谷环境(夏祖春等, 1999)。从另一个方面支持闪长岩体形成于新元古代时期 Rodinia 超大陆的裂解过程。

## 5.3 碧口群基底演化

由于锆石中的 Hf 元素含量较高, 而 Lu 含量相对极低, 因而由<sup>176</sup>Lu 衰变产生的<sup>176</sup>Hf 极少, 加之锆石具有很高的 Hf 同位素体系封闭温度(吴福元等, 2007)以及较慢的晶格扩散速度(张少兵等, 2007), 所以锆石中的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值可以代表锆石最初形成时的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值, 该比值可以为探讨其成因提供重要信息。而且, 由于锆石在岩浆演化过程中结晶较早, 因而有可能记录下混合端元各自的 Hf 同位素组成(Griffin et al., 2002), 因而被广泛应用于大陆生长和岩浆起源的研究之中。

最新的年代学研究表明, 在扬子陆块的多个区域均发现有 2.5~2.8 Ga 古元古代—新太古代陆壳物质的分布(郑永飞等, 2007), 但在碧口地块则鲜有报道。笔者获得的闪长岩锆石中古元古到新太古代 Hf 模式年龄的数据, 暗示碧口地块中太古宙至古元古代古老地壳物质存在的信息。

在碧口地块邻区有明确太古宙年龄纪录的为鱼洞子群。鱼洞子群是一套变质火山-沉积岩系, 主要由斜长角闪岩和浅粒岩所组成, 另外还夹有磁铁石英岩, 是本区重要的铁矿产出层位(王洪亮等, 2011), 曾被认为是碧口群的基底(秦克令等, 1992)。但通过对碧口群火山岩 Nd 同位素研究发现, 大部分样品的  $\epsilon_{Nd}(t) > 0$ , 表明其母岩浆主要来自地幔源区(闫全人等, 2004)。鱼洞子群以碧口地体东部勉略宁区出露最好, 研究程度较高。前人对鱼洞子群变质火山岩的年代学研究给出 2 645~2 703 Ma 的结晶年龄(秦克令等, 1992; 张宗清等, 2001; 张欣等, 2010; 王洪亮等, 2011)。此外, Nd 同位素分析显示, 鱼洞子群的  $\epsilon_{Nd}(t) = -16.37 \sim -25.73$ ,  $T_{DM}$  变化于 2.77~3.19 Ga(张宏飞等, 1997)。如果我们将铜厂闪长岩与鱼洞子基性火山岩的地球化学特征进行对比, 可以发现两者具有相似的稀土配分型式(图 5), 且两者之间大离子不相容元素以及亲铁元素之间均表现为良好的线性关系(图 9), 揭示了两者成因上的相关性。结合铜厂闪长岩锆石中得到的与鱼洞子群火山岩形成时代一致的约 2.7 Ga Hf 模式年龄, 暗示鱼洞子群的部分基性物质参与了铜厂闪长岩岩浆的形成。进而表明, 鱼洞子群可能是碧口地块基底的组成部分。

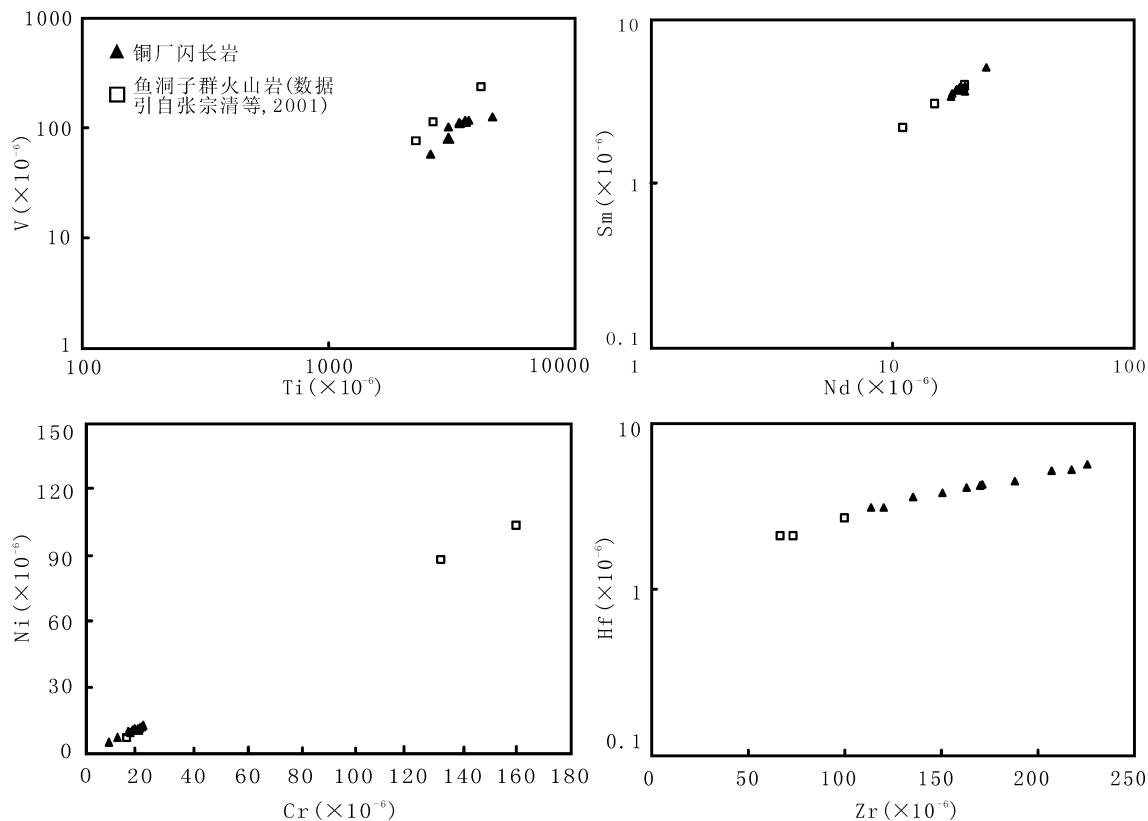


图9 铜厂闪长岩与鱼洞子群变质火山岩 Ti-V、Nd-Sm、Cr-Ni、Zr-Hf 图解

Fig. 9 Ti-V, Nd-Sm, Cr-Ni, Zr-Hf diagrams between the Tongchang diorite and the metamorphic volcanic rock of Yudongzi Group

## 6 结论

(1) 岩石学与地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究表明, 铜厂闪长岩岩浆是古老地壳物质部分熔融的结果, 鱼洞子群可能构成碧口地块的基底。

(2) 利用 LA-ICP-MS 原位锆石 U-Pb 定年获得铜厂闪长岩体的形成年龄为  $(843.7 \pm 3.8)$  Ma ( $1\sigma$ , MSWD=0.92), 结合区域地质背景, 指出闪长岩的形成与 Rodinia 超大陆的裂解有关。

(3) 闪长岩中锆石 Hf 同位素组成显示, 太古宙—古元古代期间, 扬子北缘发生过多期地壳增生事件。

致谢: 野外工作过程得益于张复新教授的大力支持; 样品测试过程中得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明、刘晔和张红等同志的热情帮助; 有关专家进行了严格评审, 提出了建设性建议, 在此一并致以诚挚的谢意。

## 参考文献 (References):

- 秦克令, 何世平, 宋述光. 碧口地体同位素地质年代学及其意义[J]. 西北地质科学, 1992, 13 (2): 97-110.
- Qin Keling, He Shiping, Song Shuguang. Isotopic Geochronology and its Significance in Bikou Terrain, China [J]. Northwest Geoscience, 1992, 13 (2): 97-108.
- 叶霖, 刘铁庚. 陕南通常矿区钠长岩和闪长岩的同位素年龄讨论[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16 (2): 114-117.
- Ye Lin, Liu Tiegeng. Discussion on Isotopic Age of Albitite and Diorite in Tongchang Ore Field in the South of Shaanxi province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16 (2): 114-117.
- 叶霖, 程增涛, 陆丽娜, 等. 陕南勉略宁地区铜厂闪长岩岩石地球化学及 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年代学

- [J]. 岩石学报, 2009, 25 (11): 2866-2876.
- Ye Lin, Cheng Zengshou, Lu Lina, et al. Petrological geochronology and Zircon SHRIMP U-Pb of Tongchang diorites. Mianlueing area, Southern Shaanxi province, China [J]. Acta Petrological Sinica, 2009, 25 (11): 2866-2876.
- 王伟, 刘树文, 吴峰辉, 等. 陕南铜厂闪长岩体的成岩、成矿时代及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47 (1): 91-102.
- Wang Wei, Liu Shuwen, Wu Fenghui, et al. Emplaced and Metallogenetic Times of Tongchang Diorities, Southern Shaanxi Province and Its Geological Implications [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47 (1): 91-102.
- 闫全人, Andrew D. Hanson, 王宗起, 等. 扬子板块北缘碧口群火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23 (1): 1-11.
- Yan Quanren, Andrew D. Hanson, Wang Zongqi, et al. Geochemistry and tectonic setting of the Bikou volcanic terrane on the northern margin of the Yangtze plate [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004, 23 (1): 1-11.
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2007, 23 (02): 317-330.
- Zheng Yongfei, Chen Renxu, Zhang Shaobing, et al. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen [J]. Acta Petrological Sinica, 23 (2): 317-330.
- 王相. 秦岭造山与金属成矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- Wang Xiang. Qinling orogenic and metallogenic [M]. Metallurgical Industry Press, Beijing, 1996.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 碧口群火山岩的时代-SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果[J]. 地质通报, 2003, 22 (6): 456-458.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, et al. SHRIMP age of Bikou volcanic rocks [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22 (6): 456-458.
- 赖绍聪, 李永飞, 秦江锋. 碧口群西段董家河蛇绿岩地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37 (增刊): 262-270.
- Lai Shaocong, Li Yongfei, Qin Jiangfeng. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of ophiolites from Dong Jiahe, Westertn section of the Bikou Group [J]. Science in China, Ser. D. 2007, 37: 262-270.
- 李曙光, 聂永红, 郑双根, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——I. 大别山同碰撞镁铁-超镁铁岩的主要元素及痕量元素地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27 (6): 488-493.
- Li Shuguang, Nie Yonghong, Zheng Shuanggen, et al. Interaction of subducted continental crust and the mantle-I: Major and trace element geochemistry of syncollisional maficultramafic intrusions in the Dabie Mountains [J]. Science in China, Ser. D. 1997, 27 (6): 488-493.
- 韩庆军, 绍济安, 周瑞. 内蒙古喀喇沁早中生代闪长岩的岩石学、地球化学及其成因[J]. 岩石学报, 2000, 16 (3): 385-391.
- Han Qingjun, Shao Jian, Zhou Rui, et al. Origin, petrology and geochemistry research of early Mesozoic diorite, Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16 (03): 385-391.
- 郭进京, 张国伟, 陆松年, 等. 中国新元古代大陆拼合与 Rodinia 超大陆[J]. 高校地质学报, 1999, 5 (2): 148-156.
- Guo Jinjing, Zhang Guowei, Lu Songnian, et al. Neoroterozoic continental block collage of China and Rodinia supercontinent [J]. Geological Journal of China Universities, 1999, 5 (2): 148-156.
- 郝杰, 翟明国. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦纪[J]. 地质科学, 2004, 39 (1): 139-152.
- Hao Jie, Zhai Mingguo. Jinning movement and Simian system in China: their relationship with Rodinia supercontinent [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39 (1): 139-152.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 南秦岭中晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解[J]. 中国科学(D), 1996a, 26 (3): 237-243.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. The characteristics of the mid-late Proterozoic volcanic rocks in south Qinling and continent rifting in the Precambrian [J]. Science in China (Series D), 1996a, 26 (3): 237-243.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 南秦岭元古宙西乡群大陆溢流

- 玄武岩的确定及其地质意义[J]. 地质论评, 1996b, 42(6): 513-522.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. The confirmation of continental flood basalt of the Proterozoic Xixiang group in the south Qinling Mountains and its geological implications [J]. Science in China, Ser. D., 1996b, 42(6): 513-522.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 碧口群火山岩岩石成因研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 84-101.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. Petrogenesis research of volcanic rocks in the Bikou Group [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 84-101.
- 丁振举, 姚书振, 周宗桂, 等. 碧口地体中元古代构造属性[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(3): 219-226.
- Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Zhou Zonggui, et al. Tectonic attribute of the mid-Proterozoic Bikou terrane [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1998, 22(3): 219-226.
- 李永飞, 赖少聪, 秦江峰, 等. 碧口火山岩系地球化学特征及 Sr-Nd-Pb 同位素组成-晋宁期扬子北缘裂解的证据[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(增刊): 295-306.
- Li Yongfei, Lai Shaocong, Qing Jiangfeng, et al. Geochemical characteristics and Sr-Nd-Pb isotopic composition of Bikou volcanic rocks-cracking evidence to the northern margin of Yangtze in Jinningian [J]. Science in China (Ser. D.), 2007, 37(Supp.): 295-306.
- 徐学义, 夏祖春, 夏林圻. 南秦岭元古宙板内火山作用特征及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 255-262.
- Xu Xueyi, Xia Zuchun, Xia Linqi. Proterozoic intraplate volcanic rocks in south Qinling Mountains and their tectonic implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 255-262.
- 裴先治. 南秦岭碧口群岩石组合特征及其构造意义[J]. 西安地质学院学报, 1989, 11(2): 46-56.
- Pei Xianzhi. The features and the tectonic significance of rock assemblage in the Bikou group, southern Qinling [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 1989, 11(2): 46-56.
- 秦克令, 金浩甲, 赵东宏. 碧口古岛弧带构造演化与成矿[J]. 河南地质, 1994, 12(4): 304-317.
- Qin Keling, Jing Haojia, Zhao Donghong. Tectonic evolution and mineralization in Bikou accient island arc belt [J]. Henan Geology, 1994, 12(4): 304-317.
- 张二朋, 牛道韞, 霍有光, 等. 秦巴及邻区地质构造特征概论[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Zhang Erpeng, Niu Daoyun, Huo Youguang, et al. Geologic tectonic features of Qinling-Dabashan and adjacent regions [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1993.
- 刘国惠, 张寿广, 游振东, 等. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Liu Guohui, Zhang Shouguang, You Zhendong. Major metamorphic groups and their evolutions in the Qinling orogenic belt [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1993.
- 夏祖春, 夏林圻, 徐学义, 等. 碧口群火山岩性质及形成环境[J]. 地质论评, 1999, 45: 681-688.
- Xia Zuchun, Xia Linqi, Xu Xueyi, et al. The Nature and formation environment of volcanic rock series of the Bikou group [J]. Geological review, 1999, 45: 681-688.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(02): 185-220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systmatics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(02): 185-220.
- 张少兵, 郑永飞. 扬子陆核的生长与再造: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 393-402.
- Zhang Shaobing, Zheng Yongfei. Growth and reworking of the Yangtze continental nucleus: evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes [J]. Acta petrological Sinica, 23(2): 393-4023.
- 王洪亮, 徐学义, 陈莺璐, 等. 南秦岭略阳鱼洞子岩群磁铁矿石岩形成时代的锆石 U-Pb 年代学约束[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1284-1290.
- Wang Hongliang, Xu Xueyi, Chen Juanlu, et al. Constraints from Zircon U-Pb Chronology of Yudongzi Group Magnetite Quartzite in the Lueyang Area,

- Southern Qinling, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85 (8): 1284-1290.
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 鱼洞子群变质岩年龄及秦岭造山带太古宙基底[J]. *地质学报*, 2001, 75 (2): 198-204.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan, et al. On the age of Metamorphic Rocks of the Yudongzi Group and the Archean Crystalline Basement of the Qinling orogen [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75 (2): 198-204.
- 张欣, 徐学义, 宋公社, 等. 西秦岭略阳地区鱼洞子杂岩变形花岗岩 LA-ICP-MS 测年及地质意义[J]. *地质通报*, 2010, 29 (4): 510-517.
- Zhang Xin, Xu Xueyi, Song Gongshe, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and significance of Yudongzi Group deformation granite from Lueyang area, western Qinling, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29 (4): 510-517.
- 张宏飞, 张本仁, 凌文黎, 等. 南秦岭新元古代地壳增生事件: 花岗质岩石钨同位素示踪[J]. *地球化学*, 1997, 26 (5): 16-24.
- Zhang Hongfei, Zhang Benren, Ling Wenli, et al. Late Proterozoic crustal accretion of south Qinling: Nd isotopic study from granitic rocks [J]. *Geochimica*, 1997, 26 (5): 16-24.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Paterson B A, et al. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon [J]. *Nature*, 2006, 439: 580-583.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61: 237-269.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 11: 357-370.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. 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]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 100-117.
- Vervoort J D, Patchett P J, Gehrels G E, et al. Constraints on early earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes [J]. *Nature*, 1996, 379: 624-627.
- Wyllie P J. Magmas and volatile components [J]. *American Mineralogist*, 1979, 64: 469-500.
- Gill J B. Orogenic Andesites and plate tectonics (Springer-Verlag) [M]. New York. 1981.
- Xu X S, Dong C W, Li W X, et al. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: the significance of the gabbro-diorite-granite association [J]. *Lithos*, 1999, 46: 199-315.
- Spulber S D, Rutherford M J. The origin of rhyolite and plagiogranite in oceanic crust: an experimental study [J]. *J. Petrol.* 1983, 24: 1-25.
- Beard J S, Lofgren G E. Effect of water on the composition of partial melts of greenstone and amphibolite [J]. *Science*, 1989, 244: 195-197.
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: evidence of mantle derived metasomatic fluids affecting crustal materials [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2001, 140: 554-566.
- Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 1217-1232.
- Barberi F, Santacroe R, Varet J. Chemical aspects of rift magmatism [A]. Palmson G. Continental and Oceanic Rifts [C]. Washington DC: American Geophysical Union, 1982, 223-258.