

德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学*

王强¹ 赵振华¹ 简平² 许继峰¹ 包志伟¹ 马金龙¹

WANG Qiang¹, ZHAO ZhenHua¹, JIAN Ping², XU JiFeng¹, BAO ZhiWei¹ and MA JinLong¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2003-08-10 收稿, 2004-03-01 改回.

Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xu JF, Bao ZW and Ma JL. 2004. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):315-324

Abstract The formation time of ore-forming porphyries associated with the Dexing porphyry copper deposit has been disputed for a long time. This paper presents the data of the Sensitive High-Resolution Ion Microprobe (SHRIMP-II) zircons geochronology data from the Tongchang and Fujiawu granodiorite porphyries. The results show that: (1) for the zircons from the Tongchang granodiorite porphyry, all 15 analyses give concordant $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages in a narrow range of 165 ~ 177Ma, which correspond to a single age population with a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 171 ± 3 Ma; and (2) for the zircons from the Fujiawu granodiorite porphyry, all 15 analyses give concordant $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages in a narrow range of 166 ~ 177Ma, which correspond to a single age population with a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 171 ± 3 Ma. This age (171 ± 3 Ma) is interpreted as the formation time of the Dexing granodiorite porphyries, and is approximately consistent with the activity of Gan-Hang rift, A-type granites, bimodal or within-plate igneous rocks or ore deposit in South China. Therefore, the Dexing porphyry copper deposit and associated granodiorite porphyries were likely formed in an extensional setting. In addition, the Dexing granodiorite porphyries have few inherited zircons, and exhibit high $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-1.14 to $+1.80$) and very low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios ($0.7044 \sim 0.7047$), which indicate that old crustal materials probably played little role in their petrogenesis but mantle-derived new materials likely played an important role. Connected with their elemental geochemical characteristics of adakites, the Dexing granodiorite porphyries were considered to possibly originate from partial melting of delaminated lower crust.

Key words SHRIMP zircon U-Pb geochronology, Adakite, Delamination, Porphyry copper deposit, Tectonic setting, Dexing, South China

摘要 德兴斑岩铜矿区的成矿斑岩的形成时代一直存在争议。本文对铜厂、富家钨花岗闪长斑岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究。研究结果显示:(1)铜厂花岗闪长斑岩样品中锆石 15 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 165 ~ 177Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 171 ± 3 Ma;(2)富家钨花岗闪长斑岩样品中锆石 15 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 166 ~ 177Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值也为 171 ± 3 Ma。因此,德兴花岗闪长斑岩形成于中侏罗世(171 ± 3 Ma)。该年龄与德兴斑岩铜矿区辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄(173 Ma)在误差范围内一致,暗示了成岩成矿的一致性。德兴花岗闪长斑岩的形成时代与华南地区许多 A 型花岗岩,双峰式或板内火成岩和矿床的形成时代也大致一致,同时也与赣-杭裂谷带的活动时间一致,表

* 本文得到国家自然科学基金项目(40273019,40172028)、中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-122, KZCX2-SW-117, KZCX2-102)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999043202)的资助。

第一作者简介:王强,男,1971年1月生,博士,副研究员,岩浆岩岩石学与地球化学, E-mail: wqiang@gig.ac.cn

明德兴斑岩铜矿和花岗闪长斑岩形成于一个伸展的动力学背景下。另外,德兴花岗闪长斑岩很少有老的继承锆石以及其高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-1.14 \sim +1.80$) 和极低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 ($0.7044 \sim 0.7047$), 暗示古老的地壳物质对其贡献并不明显, 地幔物质可能在德兴花岗闪长斑岩的成因中发挥了重要作用。再结合其具有的埃达克质岩的元素地球化学特征, 本文认为德兴花岗闪长斑岩很可能由拆沉下地壳物质的熔融形成。

关键词 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学; 埃达克岩; 拆沉; 斑岩铜矿; 构造背景; 德兴; 华南

中图分类号 P597.3; P588.13; P618.41

1 引言

作为中国东部最大的斑岩铜矿床和世界超大型斑岩铜矿之一——德兴斑岩铜矿床的成矿斑岩(花岗闪长斑岩)的形成时代一直存在争议, 从早侏罗世(193 Ma)到晚白垩世(112 Ma)的同位素年龄都有(朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984; 朱金初等, 1990; Chen & Jahn, 1998; 叶松等, 1999; 华仁民等, 2000; 金章东等, 2002)。但是这些年龄都是通过全岩-矿物 Rb-Sr 或全岩 K-Ar 方法获得的。由于同位素年龄与封闭温度的关系密切, 不同的同位素定年方法所对应的封闭温度不一样, 因此, 对于同一侵入体, 用不同的方法获得的同位素年龄往往存在差别。另外, 德兴斑岩铜矿床及其共生的花岗闪长斑岩都存在不同程度的热液蚀变(朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984; He *et al.*, 1999), 这些蚀变可能导致成矿斑岩的 Rb-Sr(金章东等, 2002)或 K-Ar 同位素的改变。因此, 封闭温度和热液蚀变都可能影响德兴花岗闪长斑岩的 Rb-Sr 或 K-Ar 年龄。一般认为, 锆石的 U-Pb 体系封闭温度最高 ($>700^\circ\text{C}$), 且性质稳定, 其 U-Pb 同位素年龄可以代表侵入体的形成时代, 而其他方法的同位素年龄往往只能代表侵入体的冷却年龄或蚀变年龄。但是, 到目前为止, 没有一个锆石同位素年龄制约德兴花岗闪长斑岩的形成时代, 这也可能是其形成时代一直存在争议的一个重要原因。另外, 德兴斑岩铜矿床一直被认为是环太平洋斑岩 Cu-Au 成矿带的一部分, 其成因被认为与古太平洋板块的俯冲有关(朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984), 近来有研究者认为该斑岩铜矿床形成与古太平洋板块俯冲所导致的赣东北地区的陆内 A 型俯冲有关(华仁民等, 2000)。本文通过对德兴花岗闪长斑岩进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学研究, 限定了其形成时代(中侏罗世, 171 ± 3 Ma), 并探讨了岩石成因、成岩与成矿动力学背景。

2 地质背景及岩石特征

构造上, 德兴地区位于扬子地块东部, 并靠近扬子与华夏地块晚元古代的缝合线——江山-绍兴断裂带(图 1)。在研究区, 有一些北东向的断裂带分布, 其中规模最大的断裂为位于研究区东部的弋阳-德兴断裂带。在研究区东南部约 50 km 处, 为北东-南西向的赣-杭裂谷。该裂谷约 450 km

长, 50 km 宽, 叠加于江山-绍兴断裂带上(图 1), 形成时代为中侏罗世-白垩纪(或可能始于早三叠世)(Gilder *et al.*, 1991, 1996; Goodell *et al.*, 1991)。德兴铜矿主要包括三个矿床: 铜厂、富家钨和朱砂红斑岩铜矿床, 共生的侵入体分别为铜厂 (0.7 km^2)、富家钨 (0.2 km^2) 和朱砂红 (0.06 km^2) 斑岩侵入体。这些斑岩侵入体主要岩石类型为花岗闪长斑岩, 并有少量的石英闪长斑岩。德兴斑岩铜矿床的铜矿化主要与花岗闪长斑岩有关。德兴斑岩铜矿床及其共生斑岩的围岩为元古代的双桥山群浅变质岩。用于进行 SHRIMP 锆石年龄分析的样品主要取自铜厂和富家钨侵入体, 岩石类型为花岗闪长斑岩。岩石具有斑状结构, 斑晶主要为斜长石、角闪石、黑云母, 少量钾长石和石英。基质具有微粒-细粒结构, 由斜长石、角闪石、黑云母、石英和钾长石组成。副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石、钦铁矿和锆石等。

3 分析方法

锆石按常规重力和磁选方法分选, 最后在双目镜下挑纯。将锆石样品与数粒 RSES 参考样 TEM 置于环氧树脂中, 然后磨至约一半, 使锆石内部暴露, 用于阴极发光 (CL) 研究及随后的 SHRIMP U-Pb 分析。锆石阴极发光研究在中国地质科学院矿床地质研究所电子探针研究室完成。SHRIMP U-Pb 分析在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成, 详细分析流程和原理见宋彪等 (2002) 及简平等 (2003)。应用 RSES 参考锆石 TEM (417 Ma) 进行元素间的分馏校正 (interelement fractionation), Pb/U 校正公式采用 $\text{Pb}/\text{U} = A (\text{UO}/\text{U})^2$ (Caoué-Long *et al.*, 1995)。应用 SL13 标样 (年龄, 572 Ma; U 含量, $238 \mu\text{g}/\text{g}$) 标定样品及 TEM 的 U, Th 和 Pb 含量。数据处理采用 Ludwig SQUID1.0 及 ISOPLT 程序 (Ludwig, 1999, 2001)。应用实测 ^{204}Pb 校正锆石中的普通铅。表 1 所列单个数据点的误差均为 1σ 。采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 其加权平均值的误差为 2σ 。

Sm-Nd、Rb-Sr 同位素在中国科学院地质与地球物理研究所的 Finnigan MAT-262 质谱上进行。详细的分析流程见 Zhang *et al.* (2002)。标样结果如下: NBS987 Sr: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710234 \pm 7$; La Jolla Nd: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511838 \pm 8$ 。实验室空白: 对 Sr 约为 $0.2 \sim 0.5 \text{ ng}$, 对于约为 50 pg 。标准化值: $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$, $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 。

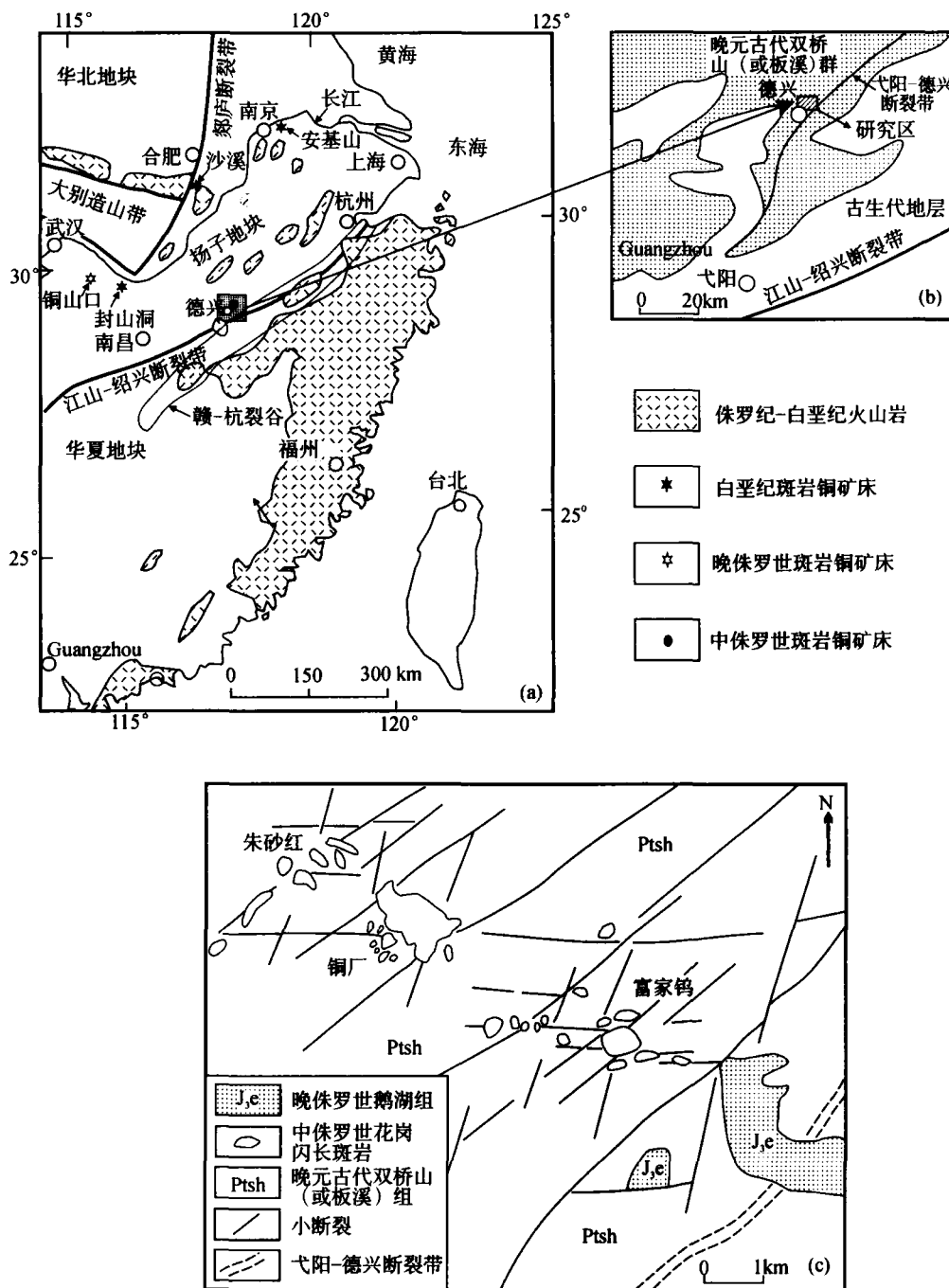


图1 德兴和邻近区域地质简图

(a) 德兴及邻区域位置图; (b) 德兴和邻区地质简图; (c) 德兴地区中侏罗世侵入岩地质图。

Fig. 1 Geological sketch map of the Dexing and adjacent areas.

4 分析结果

样品中锆石的阴极发光图象显示, 这些锆石无论颗粒大小(200 ~ 350 μm), 都具有典型岩浆锆石的韵律环带(图2)。样品 01TC-1(铜厂花岗闪长斑岩) 锆石的 U、Th 含量分别为

201 ~ 1097 $\mu\text{g/g}$ 、90 ~ 1221 $\mu\text{g/g}$, 具有典型岩浆锆石的 Th/U 比值(0.43 ~ 1.11) (表1) (Williams *et al.*, 1996)。样品 01FJW-1-2(富家钨花岗闪长斑岩) 锆石的 U、Th 含量分别为 400 ~ 675 $\mu\text{g/g}$ 、152 ~ 300 $\mu\text{g/g}$, 也具有典型岩浆锆石的 Th/U 比值(0.31 ~ 0.45) (表1)。锆石的 SHRIMP U ~ Pb 测年结果显示:(1) 01TC-1 样品中锆石 15 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年

表1 铜厂与富家钨花岗闪长斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果

Table 1 SHRIMP zircon U-Pb analytical results of the Tongchang and Fujiawu granodiorite porphyries

测点号	^{206}Pbc (%)	U ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	^{232}Th / ^{238}U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\mu\text{g/g}$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (年龄, Ma)	$^{207}\text{Pb}^*$ / $^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*$ / ^{235}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*$ / ^{238}U	$\pm\%$
铜厂												
F1.1	1.40	489	357	0.76	11	166 ± 5	0.0385	15	0.138	16	0.0260	2.8
F2.1	2.08	445	284	0.66	10	165 ± 5	0.0448	16	0.160	16	0.0259	2.8
F3.1	2.30	529	268	0.52	13	171 ± 5	0.0362	21	0.134	22	0.0268	2.8
F4.1	-	418	216	0.54	10	172 ± 5	0.0285	30	0.106	30	0.0270	2.8
F5.1	-	419	196	0.48	10	171 ± 5	0.0501	12	0.186	12	0.0269	2.8
F6.1	-	501	269	0.55	12	170 ± 5	0.0440	34	0.160	34	0.0267	3
F7.1	-	446	248	0.57	11	172 ± 5	0.0494	13	0.184	13	0.0270	2.8
F8.1	-	531	228	0.44	13	171 ± 5	0.0392	18	0.145	18	0.0269	2.7
F8.2	-	402	222	0.57	10	172 ± 5	0.0465	13	0.173	13	0.0270	2.8
F9.1	-	1097	1221	1.15	26	177 ± 4	0.0516	4	0.198	4.7	0.0278	2.6
F10.1	-	201	90	0.46	5	176 ± 5	0.0550	21	0.210	21	0.0276	3.1
F11.1	-	539	316	0.61	14	172 ± 5	0.0440	30	0.165	30	0.0270	3.1
F12.1	-	298	199	0.69	7	168 ± 6	0.0540	29	0.198	29	0.0263	3.7
F13.1	-	655	373	0.59	16	173 ± 5	0.0428	12	0.160	12	0.0272	2.7
F14.1	-	566	310	0.57	13	170 ± 5	0.0498	12	0.183	13	0.0267	2.7
富家钨												
B2.1	-	622	274	0.46	15	176 ± 5	0.0550	6.4	0.211	6.9	0.0278	2.7
B2.2	-	442	193	0.45	11	173 ± 5	0.0568	10	0.213	11	0.0272	2.7
B3.1	-	413	176	0.44	10	173 ± 5	0.0507	11	0.190	12	0.0272	2.8
B4.1	-	434	166	0.39	10	167 ± 5	0.0483	14	0.176	14	0.0264	2.8
B5.1	-	854	263	0.32	20	172 ± 5	0.0508	6.5	0.189	7.1	0.0271	2.8
B6.1	-	508	210	0.43	12	172 ± 5	0.0569	8.1	0.212	8.6	0.0270	2.7
B7.1	-	400	152	0.39	9	168 ± 5	0.0459	19	0.167	19	0.0265	2.9
B7.2	-	414	171	0.43	10	167 ± 5	0.0483	16	0.175	16	0.0263	2.8
B8.1	-	493	212	0.44	12	173 ± 5	0.0585	9.1	0.219	9.5	0.0272	2.7
B9.1	-	675	300	0.46	16	169 ± 5	0.0450	14	0.165	14	0.0265	2.7
B10.1	-	367	157	0.44	9	169 ± 5	0.0649	8	0.238	8.5	0.0266	2.7
B11.1	-	565	252	0.46	13	169 ± 5	0.0484	11	0.177	11	0.0265	2.7
B12.1	-	584	264	0.47	13	166 ± 5	0.0453	12	0.162	12	0.0260	2.9
B13.1	-	443	188	0.44	10	170 ± 5	0.0516	14	0.189	14	0.0267	2.8
B14.1	-	436	175	0.41	11	172 ± 5	0.0442	16	0.165	16	0.0271	2.8

(1) 误差为 1σ ; ^{206}Pbc 为普通 ^{206}Pb 占总 Pb 的百分比, Pb^* 为放射成因 Pb. (2) 标准校正值的误差是 0.33%.

(3) 普通 Pb 用测量的 ^{204}Pb 校正.

龄为 165 ~ 177Ma (表 1), 变化范围小, 在一致曲线图中, 数据点成群分布 (图 2), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $171 \pm 3 \text{ Ma}$ ($n=15$, $\text{MSWD}=0.47$), 代表铜厂花岗闪长斑岩的形成时代; (2) 01FJW-1-2 样品中锆石 15 个分析点 (包括锆石边

部和核部) 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 166 ~ 177Ma (表 1), 变化范围小, 在一致曲线图中, 数据点成群分布 (图 2), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值也为 $171 \pm 3 \text{ Ma}$ ($n=15$, $\text{MSWD}=0.4$), 代表富家钨花岗闪长斑岩的形成时代. 可见, 铜厂与富家钨

花岗闪长斑岩具有相同的形成时代 171 ± 3 Ma。

Nd-Sr 同位素成分显示(表 2),德兴花岗闪长斑岩的有较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ ($-1.14 \sim +1.80$),低的 T_{DM} (Nd 模式年龄) ($0.70 \sim 0.89$ Ga) 和 极低的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值($0.7044 \sim 0.7047$)。

5 讨论与结论

5.1 德兴花岗闪长斑岩的形成时代

前人报道的德兴花岗闪长斑岩的形成时代有多个,这些年龄包括:193 Ma (叶松等, 1999), 184 Ma (朱金初等, 1990; 华仁民等, 2000), 179 Ma (芮宗瑶等, 1984), 172 Ma (朱训等, 1983), 165 Ma (金章东等, 2002), 157 Ma (朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984), 140 Ma (Chen and Jahn, 1998), 121 ~ 110 Ma (朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984)。其中 193 ~ 165 Ma 的年龄主要是全岩或全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄, 而 157 ~ 110 Ma 的年龄主要是全岩或矿物的 K-Ar 年龄。同世界典型的斑岩铜矿床一样,德兴斑岩铜矿床也存在强烈的蚀变,成矿的花岗闪长斑岩斑岩也或多或少受到蚀变的影响:从侵入体中心向边部,蚀变越来越强烈(朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984; He *et al.*, 1999),并且这些蚀变直接影响

到花岗闪长斑岩的 Rb-Sr 同位素比值(金章东等, 2002)。因此,德兴花岗闪长斑岩已有的全岩或全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄可能并不代表德兴花岗闪长斑岩的真实侵位年龄。对于 K-Ar 年龄,由于全岩或矿物的 K-Ar 年龄的封闭温度较低,所以,德兴花岗闪长斑岩已有的全岩或矿物 K-Ar 年龄有两种可能的解释:(1)代表了德兴花岗闪长斑岩的冷却年龄;(2)由于德兴花岗闪长斑岩受蚀变的影响较强烈,热液蚀变可能导致花岗闪长斑岩的 K-Ar 同位素重置而产生年轻的同位素年龄。

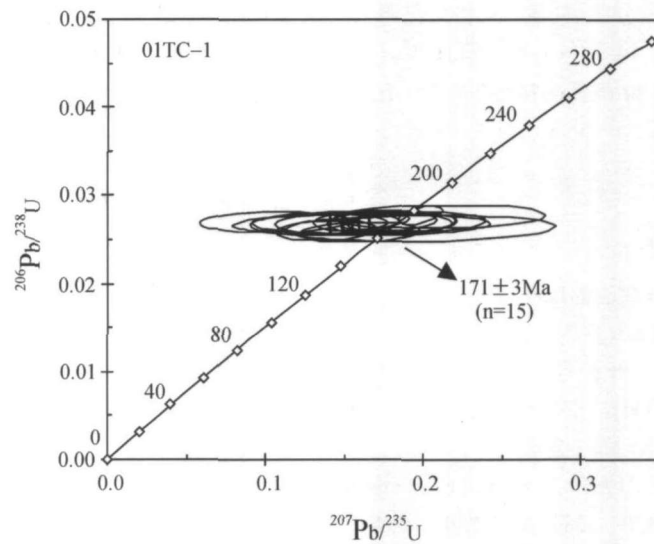
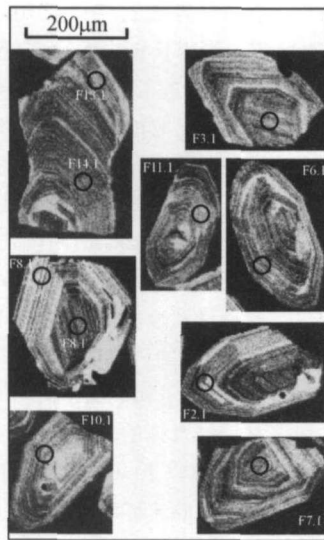
相反,锆石性质稳定,不容易受到蚀变的影响。铜厂和富家钨花岗闪长斑岩的锆石为典型的岩浆锆石(图 2),并且来自两个不同侵入体的样品都显示了相同的年龄(171 ± 3 Ma),该年龄代表了铜厂和富家钨侵入体的形成时代。由于钻孔资料显示朱砂红侵入体在地表以下 1000 m 处与铜厂侵入体相连(朱训等, 1983),我们推测朱砂红侵入体的形成时代应该与铜厂侵入体的形成时代一致。因此,德兴花岗闪长斑岩的形成时代应该为中侏罗世(171 ± 3 Ma)。最近,毛景文和王志良(2000)报道德兴斑岩铜矿床的辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄为 173 Ma,与花岗闪长斑岩的形成时代(171 ± 3 Ma)在误差范围类一致,表明德兴斑岩铜矿床的形成与花岗闪长斑岩有关(Selby *et al.*, 2002)。

表 2 德兴花岗闪长斑岩的 Nd-Sr 同位素资料

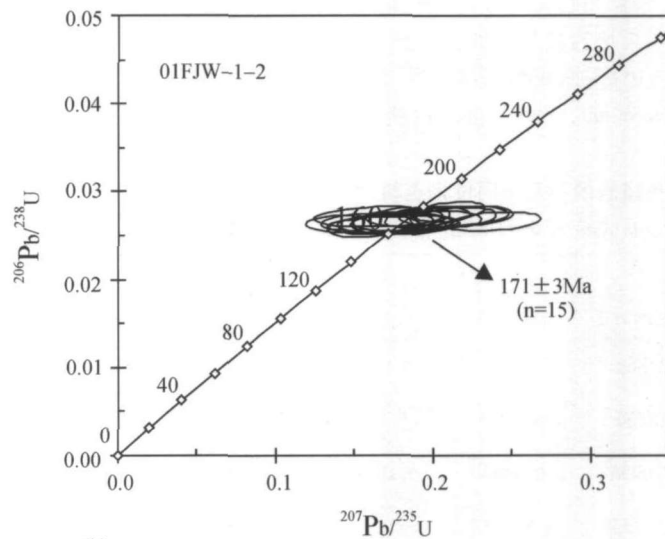
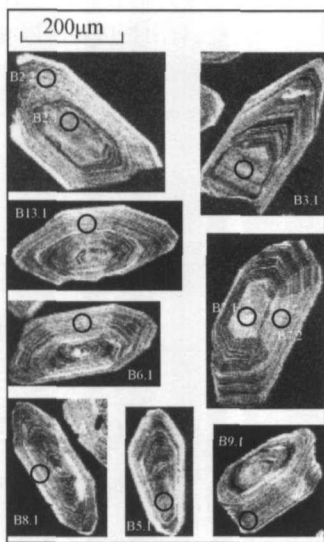
Table 2 Nd-Sr isotopic data of the Dexing granodiorite porphyries

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
样品	01FJW-1-2	01FJW-3	01FJW-4	CK307-1	CK307-4	G-83-175	01T-16	01T-17	D01
Sm ($\mu\text{g/g}$)	2.862	2.034	1.540	3.883	3.524	4.316	3.260	2.667	
Nd ($\mu\text{g/g}$)	18.20	12.77	9.14	25.56	23.06	27.12	24.58	16.69	
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.0956	0.0969	0.1025	0.0919	0.0924	0.0968	0.0797	0.0967	0.0972
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512530	0.512557	0.512555	0.512504	0.512498	0.512555	0.512485	0.512468	0.5126192
$2s_m$	± 11	± 11	± 12	± 4	± 4	± 09	± 12	± 09	± 09
f	-0.51	-0.51	-0.48	-0.53	-0.53	-0.51	-0.59	-0.51	-0.51
$\epsilon_{Nd}(t)$	0.11	0.59	0.44	-0.33	-0.46	0.56	-0.43	-1.14	1.80
T_{DM} (Ga)	0.80	0.77	0.82	0.81	0.82	0.78	0.76	0.89	0.70
Rb ($\mu\text{g/g}$)	56.12	61.60	53.92	84.78	80.29	103.7	114.1	122.8	
Sr ($\mu\text{g/g}$)	690.8	573.8	638.4	801.2	792.5	817.6	724.6	582.6	
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.2350	0.3105	0.2443	0.3062	0.2932	0.3669	0.4558	0.6098	
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.705028	0.705409	0.705110	0.705245	0.705195	0.705297	0.705511	0.7059582	
$2s_m$	± 18	± 18	± 14	± 11	± 8	± 16	± 11	± 11	
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.7045	0.7047	0.7045	0.7045	0.7045	0.7044	0.7044	0.7045	

1~8, 本文; 9, 引自朱金初等(1990); 1~5, 富家钨; 6, 朱砂红; 7~9, 铜厂。



(a)



(b)

图2 铜厂(01TC-1)和富家坞(01FJW-1-2)花岗闪长斑岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谱和图以及锆石的阴极发光电子图像
Fig.2 SHRIMP zircon U-Pb concordia diagram with cathodoluminescence electron images for samples 01TC-1 (Tongchang) and 01FJW-1-2 (Fujiawu).

5.2 成岩、成矿动力学背景

长期以来,许多研究者认为古太平洋板块向欧亚大陆的俯冲是华南地区燕山期大面积火成岩形成的重要原因(Jahn, 1974; Holloway, 1982; Zhou and Li, 2000),但近年来,在华南地区陆续报道有燕山期的变质核杂岩(Ratschbacher *et al.*, 2000 及其所引参考文献)、A型花岗岩或板内火成岩(Zhao *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2002; 邱检生等, 1999),这使得许多研究者认为岩石圈伸展或古太平洋板块的俯冲所导致弧后伸展可能是华南

地区燕山期大面积火成岩形成的重要原因(Gilder *et al.*, 1991, 1996; Xu *et al.*, 1999; Li 2000; Chen *et al.*, 2002)。近几年的研究表明,华南早侏罗世末-中侏罗世是一个非常重要的时期,许多伸展型岩浆岩或矿床产于该阶段:(1)伸展型岩浆岩,如湘南的板内碱性玄武岩(160~180Ma)(Zhao *et al.*, 1998),桂东南的裂谷型钾玄质侵入岩(158~165Ma, Li *et al.*, 2000),赣南的双峰式火山-侵入杂岩(158~179Ma, Chen *et al.*, 2002)和A型花岗岩或碱性侵入岩(165~173Ma, Li *et al.*, 2003);(2)伸展型矿床:如广东梅州与早侏罗世末-中侏罗世(171~178Ma)的层状镁铁质-超镁

铁质侵入岩共生的钒钛磁铁矿(邢光福等, 2001; 陈忠权等, 2002); (3) 湘东南与铜多金属矿床共生的花岗闪长岩的形成时代为早侏罗世末-中侏罗世(172~181Ma)(Wang *et al.*, 2002)。上述资料表明, 华南地区在早侏罗世末-中侏罗世发育了较广泛的伸展型岩浆活动与成矿作用, 暗示该阶段华南为一伸展的动力学背景。另外, 上述大部分伸展型岩浆岩或矿床(如湘南与桂东南地区)的产出于华南腹地的十万大山-杭州裂谷带(即“十-杭带”)(Gilder *et al.*, 1996)或“低 T_{DM} -高 ϵ_{Nd} 带”(Chen and Jahn, 1998)南段, 暗示这些区域是岩石圈伸展或幔源岩浆强烈活动带。德兴花岗闪长斑岩和斑岩铜矿靠近十万大山-杭州裂谷带的北段——赣-杭裂谷(图1), 并且二者在形成时代上相似, 前者形成于中侏罗世, 后者活动始于中侏罗世(或晚三叠世)(Gilder *et al.*, 1991, 1996; Goodell *et al.*, 1991)。因此, 同华南其他地区一样, 德兴地区中侏罗世也为一伸展的构造背景, 区内花岗闪长斑岩和斑岩铜矿形成于该伸展的构造背景中, 而不是形成于古太平洋板块的俯冲所导致的大陆边缘弧(朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984)或陆内 A 型俯冲(华仁民等, 2000)的挤压环境中。

5.3 岩石、矿床成因

元素地球化学研究显示, 德兴花岗闪长岩具有埃达克岩(adakite)的地球化学特征(Wang *et al.*, 2003)。对于中国东部的燕山期埃达克质岩的成因, 主要有两种成因模式: 增厚古老下地壳物质的熔融(张旗等, 2001, 2004; Wang *et al.*, 2003), 新底侵下地壳物质的熔融(王强等, 2001; 张旗等, 2001)和拆沉下地壳物质的熔融(Defant *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2002; 王强等, 2004)。由于拆沉下地壳物质熔融形成的埃达克质岩浆在穿过地幔的过程中, 将会与地幔橄榄岩发生反应。因此, 这类埃达克质岩一般具有较高的地幔组分(Xu *et al.*, 2002; 王强等, 2004)。另外, 新底侵下地壳物质直接来自于地幔, 因此其熔融形成的埃达克质岩也含有较高的地幔组分(Atherton & Petford, 1993)。

德兴花岗闪长岩中的锆石、年代学资料以及同位素成分也暗示, 德兴埃达克质花岗闪长斑岩可能也含有较多的地幔组分。一般认为, 古老地壳熔融或地壳混染形成的花岗质岩石会有老的继承锆石(Encarnación and Mukasa, 1997; Tchameni *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2002)。一些研究者认为德兴花岗闪长斑岩的形成可能与古老地壳物质熔融或受到元古代变质岩的混染有关(叶松等, 1999; Shen *et al.*, 2000)。但是, 在所分析的铜厂和富家钨花岗闪长斑岩样品中不同大小锆石边部和核部共 30 个分析点都给出了一致的谱和年龄 171 ± 3 Ma, 暗示铜厂和富家钨花岗闪长斑岩可能缺少或含有较少的老继承锆石。另一方面, 德兴花岗闪长斑岩具有高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、低的 T_{DM} 和极低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(表 2), 并且在 $\epsilon_{Nd}(t)$ -年龄图解(图 3)中落在扬子地块地壳演化线的上部, 也进一步暗示幔源物质在德兴花岗闪长斑

岩的成因中发挥了重要作用。下地壳熔融和玄武质岩石在 1.0~4.0 GPa 的条件下熔融形成的埃达克质岩浆或熔体的 $\text{Mg}^{\#}(100 \times \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{\text{total}}))$ 一般小于 47(Rapp *et al.*, 1999; Smithies, 2000)。但是, 德兴埃达克质花岗闪长斑岩的 $\text{Mg}^{\#}(100 \times \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{\text{total}})) = 48 \sim 53$ (Wang *et al.*, 2003), 暗示其不可能由新底侵下地壳物质熔融形成(Smithies, 2000)。因此, 还存在的一种可能性就是, 德兴埃达克质花岗闪长斑岩由拆沉下地壳物质熔融形成, 熔融产生的埃达克质岩浆在穿过地幔的过程中, 将会与地幔橄榄岩发生反应, 导致岩浆中的地幔组分增高(Defant *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2002; 王强等, 2004)。

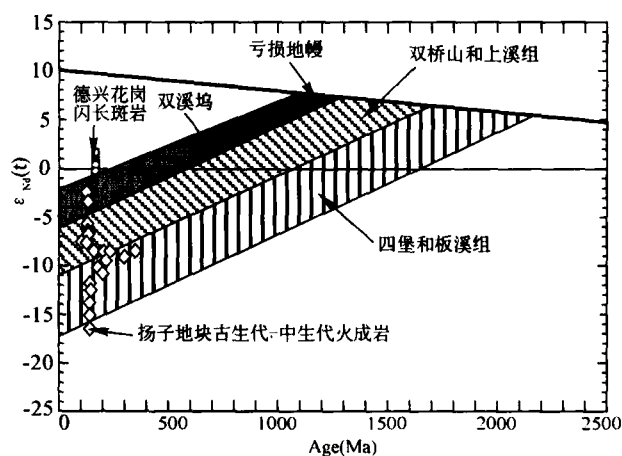


图 3 扬子克拉通 Nd 同位素演化图(Chen and Jahn, 1998) 在扬子地块中, 两次主要的地壳形成事件分别以板溪群-四堡群(约 1800 Ma)和上溪群-双桥山群(约 1400 Ma)为代表。第三次地壳形成事件以双溪坞群(约 1000 Ma)为代表。元古代的岩石在扬子地块古生代-中生代火成岩的形成中发挥了重要的作用(Chen and Jahn, 1998)。但是德兴花岗闪长斑岩显示了异常高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (朱金初等, 1990; Chen and Jahn, 1998; 本文), 暗示岩石中有明显的幔源新物质的加入。古生代-中生代火成岩的 Nd 同位素资料引自文献 Chen and Jahn (1998) 及其所参考文献。

Fig. 3 Nd isotopic evolution diagram for the Yangtze Craton (Chen and Jahn, 1998).

德兴斑岩铜矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 + 0.12‰(平均值), 接近陨石的硫同位素组成, 显示了地幔硫的特征(朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984), 与花岗闪长斑岩的来源一致。因此, 德兴花岗闪长斑岩与斑岩铜矿床在形成时代和物质来源上的一致性, 暗示该斑岩铜矿床的成矿物质也可能主要是由花岗闪长质岩浆从地幔深处携带到地壳浅处的。

致谢 张旗研究员和另外两位审稿专家对本文初稿进行了细致认真地审阅, 并提出了相当中肯、有益的建议, 在此表示衷心的感谢! 锆石 SHRIMP U-Pb 分析得到了中国地质科学院地质所刘敦一教授、宋彪教授、陶华工程师、张玉海高级

工程师的帮助。Nd-Sr 同位素分析得到了李潮峰工程师的帮助。野外工作得到了江西德兴铜矿地测科孙信牙主任、戴犹芳工程师的帮助。在此一并表示衷心的感谢。

References

- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144 - 146
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of Southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284:101 - 133
- Chen P R, Hua R M, Zhang B T, Lu J J, Fan C F. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: petrological constraints and geodynamic settings. *Science in China (Series D)*, 45 (8): 755 - 768
- Chen Z Q, Wu J T, Kuang Y G. 2002. Characteristics of the Xialan intrusion of basic-intermediate composition in Xingning. *Guangdong Geology*, 17(1): 38 - 43 (in Chinese with English abstract)
- Claoue-Long J C, Compston W, Roberts J, Fanning C M. 1995. Two Carboniferous ages: a comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. In: Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, Hardenbol J (eds.), *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation: SEPM special publication*, 5(4): 3 - 31
- Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q, Xiao L. 2002. Adakites: Some Variations on a Theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129 - 142
- Encarnación, J and Mukasa, S B. 1997. Age and geochemistry of an anorogenic crustal melt and implications for I-type granite petrogenesis. *Lithos*, 42:1 - 13
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao X, Liu Z, Wang G, Yuan K, Liu W, Kuang G and Wu H. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *J. Geophys. Res.*, 101: 16137 - 16154
- Gilder S A, Keller G R, Luo M, Goodell P C. 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, 197: 225 - 243.
- Goodell P C, Gilder S, Fang X H. 1991. A preliminary description of the Gan-Hang failed rift, southeastern China. *Tectonophysics*, 197: 245 - 255
- He W W, Bao Z Y, Li T P. 1999. One-dimensional reactive transport models of alteration in the Tongchang porphyry copper deposit, Dexing district, Jiangxi Province, China. *Economic geology*, 94: 307 - 321
- Holloway N H. 1982. North Palawan Block, Philippines-Its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66:1355 - 1383
- Hua R M, Li X F, Lu J J, Chen P R, Qiu D T, Wang G. 2000. Study on the tectonic setting and ore-forming fluids of Dexing large ore-concentrating area, northeast Jiangxi province. *Advance in Earth Sciences*, 15(5): 525 - 533. (in Chinese with English abstract)
- Jahn B M. 1974. Mesozoic thermal events in southeast China. *Nature*, 248, 480 - 483
- Jian P, Liu D Y, Sun X M. 2003. SHRIMP dating of Carboniferous Jinshajiang ophiolite in western Yunnan and Sichuan: geochronological constraints on the evolution of the Paleo-Tethys oceanic crust. *Acta Geologica Sinica*, 77 (2): 217 - 277 (in Chinese with English abstract)
- Jin Z D, Zhu J C, Li F C. 2002. O, Sr and Nd isotopic tracing of the ore-forming process in Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi province. *Mineral Deposits*, 21(4): 341 - 349. (in Chinese with English abstract)
- Li X H, Zhou H W, Liu Y, Lee C Y, Sun M, Chen C H. 2000. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: Petrology and geochemistry. *Chinese Science Bulletin*, 45(7): 653 - 659
- Li X. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China. *Journal of Asian Earth Science*, 18:293 - 305
- Li X H, Chen Z G, Liu D Y, Li W X. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi province, SE China: Age, origin and tectonic significance. *Int. Geol. Rev.*, 45: 898 - 921
- Ludwig K R. 1999. Using Isoplot/EX, version 2, a geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center Special Publication 1a, 47 p
- Ludwig K R. 2001. Squid 1.02: A user manual. Berkeley Geochronological Center Special Publication 2, 19 p
- Mao J W, Wang Z L. 2000. Preliminary study on time limits and geodynamic setting of large-scale metallogeny in east China. *Mineral Deposits*, 19(4): 289 - 296 (in Chinese with English abstract)
- Qiu J S, Wang D Z, McInnes B I A. 1999. The geochemistry and petrogenesis of I-A type multiple granite bodies in the Minzhe coast area. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237 - 246 (in Chinese with English abstract)
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335 - 356
- Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong S W, Calvert A, Chateigner D and Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *J. Geophys. Res.*, 105: 13303 - 13338
- Rui Z Y, Huang C K, Qi G M, Xu J, Zhang H T. 1984. Porphyry copper (molybdenum) deposits of China. Beijing: Geological Publishing House. 1 - 350 (in Chinese with English abstract)
- Selby D, Creaser R A, Hart C J R, Rombach C S, Thompson J F H, Smith M T, Baker A A, Goldfarb R J. 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralization: A comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods from the Titina Gold Belt, Alaska. *Geology*, 30: 791 - 794
- Shen W Z, Ling H F, Li W X, Wang D Z. 2000. Crust evolution in southeast China: evidence from Nd model ages in granitoids.

- Science in China(Series D), 43(1): 36-49
- Smithies, R H. 2000. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182: 115-125
- Song B, Zhang Y H, Wan Y S, Jian P. 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26-30 (in Chinese with English abstract)
- Tcameni R, Mezger K, Nsifa N E and Poulet A. 2001. Crustal origin of early proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem Complex), South Cameroon. *Lithos*, 57: 23-42
- Wang Q, Zhao Z Z, Xiong X L, Xu J F. 2001. Crustal growth and the melting of mafic lower crust: evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, in Anhui province, China. *Geochimica*, 30(4): 352-362 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao Z H, Xu J F, Bai Z H, Wang J X, Liu C X. 2004. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei; (delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 351-360 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao Z H, Xu J F, Li X H, Bao Z W, Xiong X L, Liu Y M. 2003. Petrology and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block. *Science in China(Series D)*, 46(sup.): 164-176
- Wang Y J, Fan W M, Guo F, Li H M, Liang X Q. 2002. U-Pb dating of early Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province, South China and its petrogenetic implications. *Science in China(Series D)*, 45(3): 280-288
- Williams I S, Buick A, Cartwright I. 1996. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynold Region, central Australia. *J. Metamorphic Geol.*, 14: 29-47
- Xing G F, Yang Z L, Sun Q H, Shen J L, Tao K Y. 2001. The study of early Jurassic basic-ultrabasic intrusion in the Meizhou area, Guangdong province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(3): 172-174 (in Chinese with English abstract)
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q, Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30: 1111-1114.
- Xu X S, Dong C W, Li W X, Zhou X M. 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China; the significance of the gabbro-diorite-granite association. *Lithos*, 46: 299-315
- Ye S, Ye D L, Mo X X, Tai D Q, Wang Q, Ye N. 1999. relationships between the deep-sourced magmatism and metallogeny in Dexing densely ore deposited area, Jiangxi province, China. *Geological Journal of China Universities*, 12(5): 395-404 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qin K Z, Wang Y L, Zhang F Q, Liu H T, Wang Y. 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): ? (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, et al. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in yanshanian period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236-244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from Major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144: 241-253
- Zhao Z H, Bao Z W, Zhang B Y. 1998. Geochemistry of the Mesozoic basaltic rocks in southern Hunan Province. *Science in China(Series D)*, 41(sup.): 102-110
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269-287
- Zhu J C, Shen W Z, Liu C S, Xu S J. 1990. Nd-Sr isotopic characteristics and petrogenesis discussion of Mesozoic granitoids in South China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9(2): 97-104 (in Chinese with English abstract).
- Zhu X, Huang C K, Rui Z Y, Zhou Y H, Zhu X J, Hu C S, Mei Z K. 1983. The geology of Dexing porphyry copper ore field. Beijing: Geological Publishing House, 1-336 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈忠权, 吴甲添, 邝永光. 2002. 兴宁霞岗基性-中性岩体特征. *广东地质*, 17(1): 38-43
- Defant M J, 许继峰, Kepezhinskas P, 王强, 张旗, 肖龙. 2002. 埃达克岩: 关于其成因的一些不同观点. *岩石学报*, 18(2): 129-142
- 华仁民, 李晓峰, 陆建军, 陈培荣, 邱德同, 王果. 2000. 德兴大型铜金矿集区构造环境和成矿流体研究进展. *地球科学进展*, 15(5): 525-533
- 简平, 刘教一, 孙晓猛. 2003. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年: 古特第斯洋壳演化的同位素年代学制约. *地质学报*, 77(2): 217-227
- 金章东, 朱金初, 李福春. 2002. 德兴斑岩铜成矿过程的氧、锶、钕同位素证据. *矿床地质*, 21(4): 341-349
- 毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景初步探讨. *矿床地质*, 19(4): 289-296
- 邱检生, 王德滋, McInnes B I A. 1999. 浙闽沿海地区 I 型-A 型复合花岗岩体的地球化学及成因. *岩石学报*, 15(2): 237-246
- 芮宗瑶, 黄崇珂, 齐国明, 徐珏, 张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京: 地质出版社, 1-350
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26-30
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. *地球化学*, 30

- (4): 353 - 362
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. 岩石学报, 20(2): 351 - 360
- 邢光福, 杨祝良, 孙强辉, 沈加林, 陶奎元. 2001. 广东梅州早侏罗世层状基性-超基性岩体研究. 矿物岩石地球化学通报, 20(3): 172 - 174
- 叶松, 叶德隆, 莫宜学, 邵道乾, 王群, 叶枏. 1999. 深源岩浆作用与江西德兴大型矿集区成矿关系. 高校地质学报, 5(4): 395 - 404
- 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面. 岩石学报, 20(2): 195 - 204
- 张旗, 王焰, 钱青等. 2001. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236 - 244
- 朱金初, 沈渭洲, 刘昌实, 徐士进. 1990. 华南中生代同熔系列花岗岩类的 Nd-Sr 同位素特征及成因讨论. 岩石矿物学杂志, 9(2): 97 - 104
- 朱训, 黄崇轲, 芮宗瑶, 周耀华, 朱贤甲, 胡综生, 梅占魁. 1983. 德兴斑岩铜矿. 北京: 地质出版社. 1 - 336