

# 湖南水口山花岗闪长岩的地球化学特征及成因

黄金川<sup>1,2</sup>, 彭建堂<sup>1,3\*</sup>, 阳杰华<sup>1</sup>, 徐春霞<sup>1,2</sup>, 胡思柏<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中南大学地球物理与信息物理学院, 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 4. 湖南省水口山有色金属集团有限公司, 湖南 常宁 421513)

**摘要:** 中生代花岗质岩石在华南分布广泛, 且常与 W-Sn、Pb-Zn 等金属矿床具有紧密的时空联系, 而湖南水口山花岗闪长岩是与 Pb-Zn 成矿作用有关的典型代表。与华南改造型花岗岩相比, 水口山花岗闪长岩及其成矿作用的研究程度较低。本文系统研究了该花岗闪长岩的岩相学特征、主元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素组成, 重点讨论了其岩石成因类型、物质来源及形成的构造环境。研究结果表明, 水口山花岗闪长岩为贫 SiO<sub>2</sub>、富碱、富铁镁、准铝质-弱过铝质的高钾钙碱性岩; 表现出轻稀土元素富集, 轻重稀土分馏强烈, 弱负 Eu 异常; 不相容元素 Ba、Ta、Nb、Sr、Ti 亏损, 而 Rb、Th、U、K、LREE 相对富集的特征。岩体的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 比值为 0.707364~0.711380, ε<sub>Nd</sub>(t) 值为 -6.61~-2.40, 具明显的亏损地幔和华南上地壳混合特征。水口山花岗闪长岩的矿物组成、元素地球化学和同位素地球化学特征均表明, 该岩体为同熔型花岗岩。该岩体是在晚中生代由太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲诱发的华南板块伸展-减薄构造环境下, 玄武岩岩浆上涌, 底侵中下地壳, 与中上地壳混合形成的燕山早期高钾钙碱性花岗岩。

**关键词:** 花岗闪长岩; 地球化学特征; 同熔型花岗岩; 水口山矿田

中图分类号: P59 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)02-0131-14

## Geochemistry and genesis of the Shuikoushan granodiorite in Hunan, South China

HUANG Jin-chuan<sup>1,2</sup>, PENG Jian-tang<sup>1,3\*</sup>, YANG Jie-hua<sup>1</sup>, XU Chun-xia<sup>1,2</sup> and HU Si-bai<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. MOE Key Laboratory of Non-Ferrous Metals Metallogenic Prediction, School of Geophysics and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;  
4. Shuikoushan Nonferrous Metals Group Co. Ltd., Changning 421513, China

**Abstract:** Mesozoic granitoids occur extensively in South China, and are generally associated with W-Sn deposits and Pb-Zn deposits temporally and spatially. The Shuikoushan pluton is a typical granodiorite related with Pb-Zn hydrothermal mineralization. However, the petrogenesis of this pluton and its relevant mineralization are poorly constrained. The petrological and geochemical (major elements, trace elements and Sr-Nd isotopes) characteristics, together with the genetic type, magma source and formation tectonic background, of the Shuikoushan pluton are documented and discussed in this study. The rocks from the Shuikoushan pluton display low SiO<sub>2</sub> contents, high K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O contents, indicating that they are metaluminous to weakly peraluminous, belonging to the high potassium calc-alkaline series. They are characterized by LREE-enrichment, remarkable fractionation between LREE and HREE, and weak negative Eu anomalies. In addition, they are enriched in Rb, Th, U, K and LREE, but depleted in Ba, Ta, Nb, Sr and Ti. The initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr and ε<sub>Nd</sub>(t) values for the pluton range between 0.707364~0.711380 and -6.61~-2.40, respectively, displaying an obvious mixing between the depleted mantle and the upper crust of South China. All petrographical and geochemical evidences reveal that the Shuikoushan granodiorite is of the syntexis type. The granodiorites can be interpreted as being resulted from anorogenic

收稿日期(Received): 2014-05-12; 改回日期(Revised): 2014-07-21; 接受日期(Accepted): 2014-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB416705)

作者简介: 黄金川(1987-), 女, 博士研究生, 矿床地球化学专业。E-mail: jchhuang@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): PENG Jian-tang, E-mail: jtpeng@126.com, Tel: +86-851-5895405

magmatism, which is mixed with upwelling mantle-derived and upper crust magmas in response to the lithosphere extension and crust thinning due to Mesozoic subduction beneath South China Block.

**Key words:** granodiorite; geochemistry; syntexis type granite; Shuikoushan orefield, South China

## 0 引言

华南地区花岗岩,尤其是中生代花岗岩,分布十分广泛;且这些中生代花岗岩与该区钨锡、铅锌等矿床具有密切的时空联系,如南岭地区中生代大爆发成矿主要受大规模花岗岩岩浆活动控制<sup>[1]</sup>,因此华南花岗岩的研究历来受到人们的高度重视<sup>[2-7]</sup>。

Chappell *et al.*(1974)基于物质来源将花岗岩分为S型和I型<sup>[8]</sup>,Ishihara(1977)基于环境条件将花岗岩分为磁铁矿系列和钛铁矿系列<sup>[9]</sup>,Loisella *et al.*(1979)提出A型花岗岩的概念<sup>[10]</sup>,徐克勤等(1983)根据成岩物质来源将花岗岩分为同熔型、陆壳改造型和幔源型3个类型<sup>[5]</sup>。按照徐克勤的分类方案,华南花岗岩主要有两种类型<sup>[5]</sup>:一类为与Pb、Zn、Cu成矿作用有关的中酸性同熔型花岗岩,如湖南水口山、宝山和铜山岭等铅锌多金属矿矿区出露的花岗闪长岩、花岗斑岩;另一类为与W、Sn、Nb、Ta等稀有金属成矿作用有关的酸性改造型花岗岩,如湖南瑶岗仙、柿竹园、江西西华山和漂塘等钨矿矿区出露的花岗岩。已有的研究表明,上述两类花岗岩及其成矿作用在岩石学、物质来源、成矿系统、矿床成因和构造地质背景等方面均存在明显的差别<sup>[7,11]</sup>。

自20世纪40年代以来,前人已对改造型花岗岩及其有关的钨锡矿床进行了大量的研究<sup>[2,4,12-17]</sup>;相对而言,华南同熔型花岗岩及其相关的铅锌成矿作用,研究程度较低<sup>[18-20]</sup>。湘南水口山矿田中的花岗闪长岩与该区铅锌成矿关系密切,该岩体长期被认为是同熔型花岗岩<sup>[19,21,22]</sup>,但前人对其成因类型的判断主要基于铝饱和指数和稀土元素分布模式等方面的证据,而缺乏从矿物组成、主元素和微量元素等方面进行有效判别;该花岗闪长岩的成岩构造环境也存在争议。故本文拟在前人工作的基础上,以水口山花岗闪长岩为研究对象,试图从其岩相学特征、元素地球化学和Sr-Nd同位素特征等方面入手,详细判断其岩石成因类型,进而探讨其物质来源以及形成的构造环境,这有助于查明水口山矿田成岩过程、弄清其成岩与成矿的关系。

## 1 地质背景及岩相学特征

水口山矿田位于湖南衡阳断陷盆地南缘,耒阳-临武南北向褶皱带北端,距衡阳市40 km。水口山矿田是在华夏地块中生代大规模成矿过程中形成的与花岗岩有关的铅锌矿床的典型代表,同时也是我国重要的铅锌、贵金属生产基地。区内岩浆活动强烈,共发现72个大小岩体(脉),地表出露总面积约4.8 km<sup>2</sup>,由西向东依次发育有鸭公塘-中区-[0]老鸦巢花岗闪长岩、老盟山英安玢岩和新盟山流纹斑岩,局部有花岗斑岩(图1)。另外,本次在老盟山英安玢岩中还发现有橄榄岩包体。

花岗闪长岩是水口山矿田分布最广的岩浆岩,位于鸭公塘倒转背斜轴部两侧,在鸭公塘、中区和老鸦巢等矿区均有出露。其中,出露于老鸦巢矿区的花岗闪长岩体规模最大,岩体呈岩盆、岩盖超覆产出,剖面呈“蘑菇”状。前人普遍认为该岩体与老鸦巢铅锌金矿床在时间、空间和成因上具有密切联系<sup>[19,22]</sup>。此外,鸭公塘和中区等矿区受资源枯竭、地下水淹没等因素影响,难以采到新鲜的岩体样品,故本次研究的花岗闪长岩样品均采自老鸦巢矿区。

根据野外观察和薄片鉴定,老鸦巢矿区出露的岩体为中粒黑云母花岗闪长岩。新鲜的岩石样品呈暗灰色、灰色,等粒结构或似斑状结构,块状构造(图2a)。主要矿物有斜长石(30%~50%,An 27~38)、钾长石(10%~20%)、石英(22%~35%)、角闪石(5%~10%)和黑云母(5%~10%)(图2b至图2d);副矿物为锆石、磷灰石、黄铁矿、磁铁矿、独居石、金红石、钼石、榍石、石榴子石和萤石等(图2e和图2f)。

斜长石呈自形-半自形板状、柱状,聚片双晶(图2b)和环带结构发育,部分呈卡纳复合双晶,沿环带常蚀变为绢云母和高岭土等黏土矿物,尤其在边部熔蚀发育。常含石英、黑云母、磷灰石、锆石、磁铁矿等包裹体(图2e)。

石英常被熔蚀为港湾状-浑圆状和他形不规则状,波状消光明显(图2b)。

钾长石主要为正长石、微斜长石和极少量条纹长石,普遍具卡式双晶、不明显的环带及格子双晶

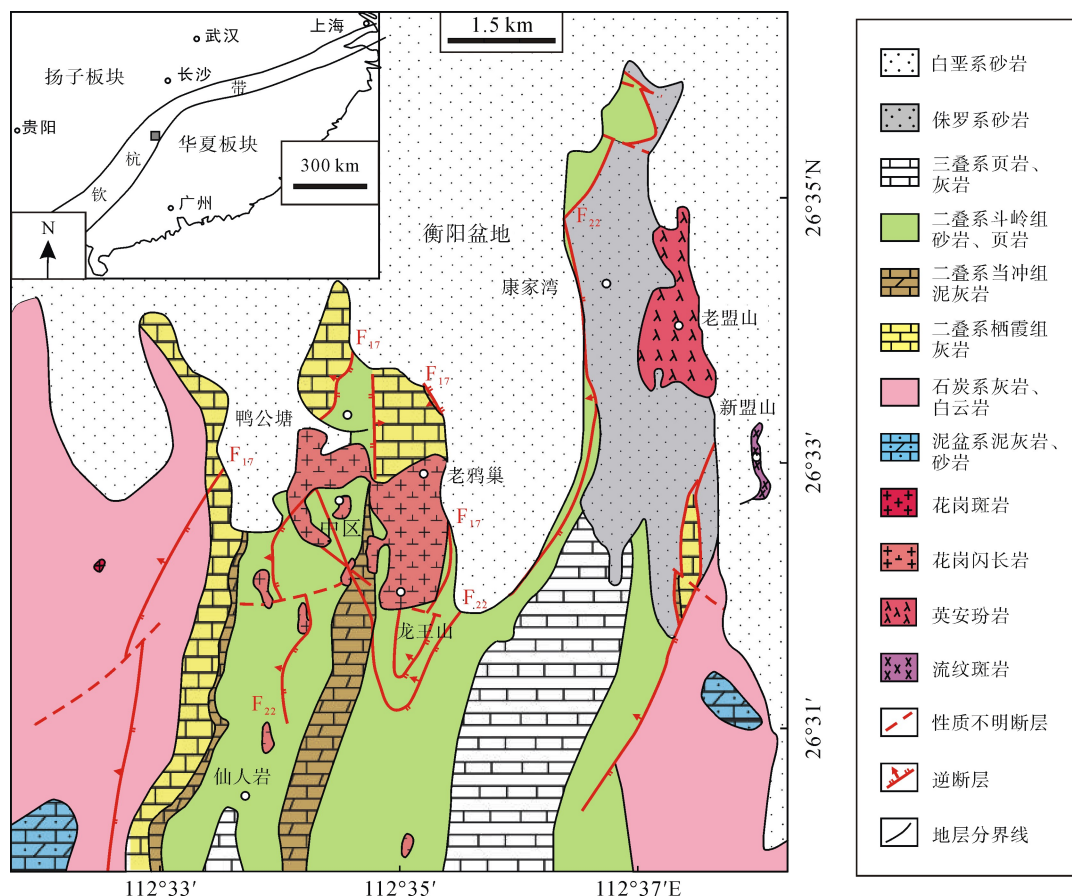


图 1 湖南水口山矿田区域地质图(据文献[22]修改)

Fig.1 Simplified geological map for the Shuikoushan deposit in Hunan (modified after reference [22])

(图 2d), 偶见条纹结构及扇状双晶, 局部也见绢云母化和高岭土化(图 2c)。常见石英、云母、钼石和锆石等包体(图 2d)。

黑云母呈自形-半自形, 红褐色, 少数红棕色, 呈片状, 多色性明显, 解理非常清晰, 具暗化边; 除个别颗粒绿泥石化和碳酸盐化外, 黑云母通常比较新鲜。常见磷灰石、锆石(图 2c 和图 2e)、磁铁矿、角闪石和榍石(图 2e)等细小矿物包体分布于黑云母中。

角闪石多为暗褐色, 假六边形, 个别蚀变为绿泥石, 解理不明显。

## 2 样品采集和分析方法

本次研究所用的样品均采自老鸦巢矿区 12 中段花岗闪长岩的新鲜岩体, 无污染破碎至 200 目以下。

样品的主元素和微量元素分析均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。岩石主元素采用 Axios PW4400 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)方法完成, 元素分析的重现性(准确度)

优于 3%, FeO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 采用湿化学分析方法。微量元素采用加拿大 ELAN DRC-e 型 Q-ICP-MS 完成, 分析精度优于 10%, 微量元素具体分析流程参照文献[23]。

Sr、Nd 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素室完成, 全岩样品采用 HF+HClO<sub>4</sub> 法溶样。测试仪器为美国 Thermo Fisher 公司生产的 Triton 热电质谱仪, <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr 比值通过 <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.1194 进行标准化; <sup>146</sup>Nd/<sup>147</sup>Nd 比值利用 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219 进行标准化。<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 利用 ICP-MS 测得的 Rb、Sr 和 Sm、Nd 的丰度计算得出。本文利用 Geokit 软件[24]对岩石地球化学数据进行了处理。

## 3 岩石地球化学特征

### 3.1 主元素

水口山花岗闪长岩的主元素分析结果见表 1。其主要特征为: (1) SiO<sub>2</sub> 含量为 60.0%~65.2%, 平均为 62.7%; 在 TAS 图解中, 本次分析的样品落于石

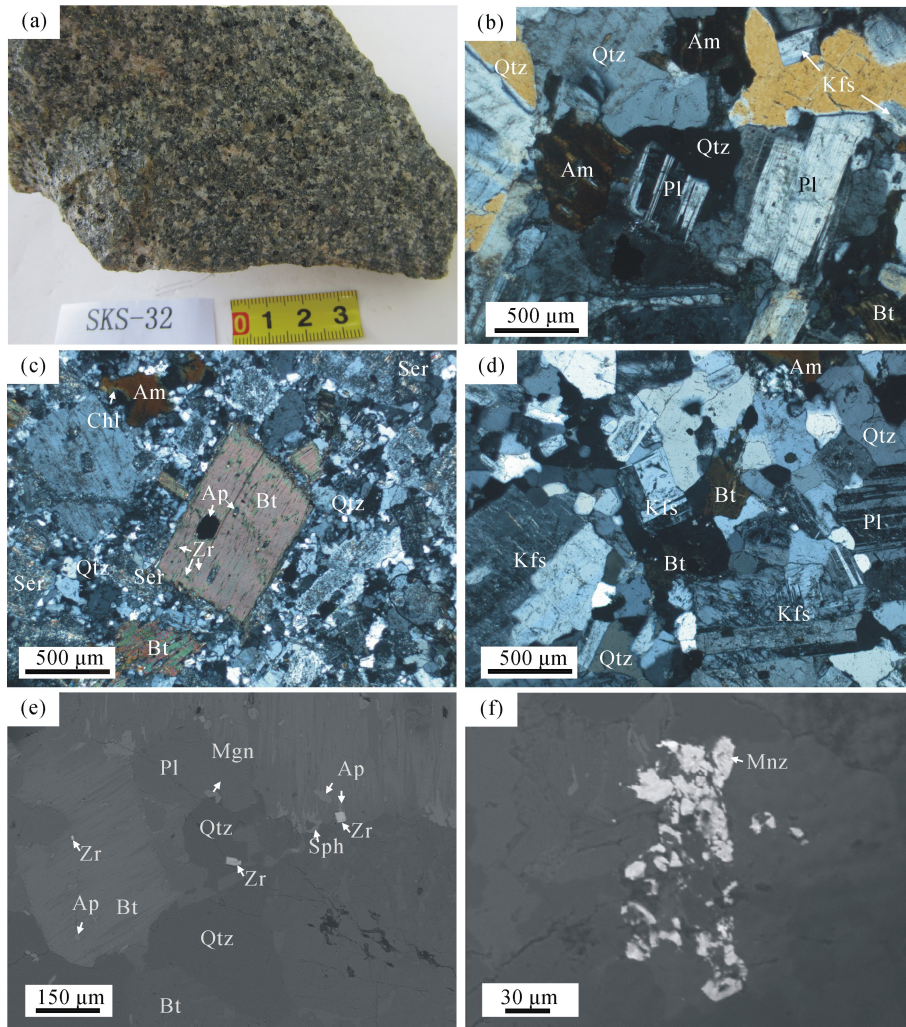


图 2 水口山花岗闪长岩手标本及显微特征

Fig.2 Hand specimen and microscopic characteristics of the Shuikoushan granodiorite

(a) 手标本; (b) 花岗结构(正交偏光); (c)和(d) 似斑状结构(正交偏光); (e)和(f) 背散射图像。Qtz-石英; Pl-斜长石; Kfs-钾长石; Am-角闪石; Bt-黑云母; Chl-绿泥石; Ser-绢云母; Ap-磷灰石; Sph-榍石; Thor-钍石; Zr-锆石; Mag-磁铁矿; Mnz-独居石。

(a) Hand specimen; (b) granitic texture (cross-polarized light); (c) and (d) porphyritic-like texture (cross-polarized light); (e) and (f) BSE image. Qtz - Quartz; Pl - plagioclase; Kfs - K-feldspar; Am - amphibole; Bt - biotite; Chl - chlorite; Ser - sericite; Ap - apatite; Sph - sphene; Zr - zircon; Mag - magnetite; Mnz - monazite.

英二长岩、二长岩、花岗闪长岩和闪长岩区域中(图 3a)。(2)  $K_2O+Na_2O$  含量为 5.60%~7.55%, 碱含量偏低;  $K_2O/Na_2O$  比值为 1.07~3.39, 多数在 1.07~1.82 之间, 仅样品 SKS-30 为 3.39, 表现出相对富钾特征。在  $K_2O-SiO_2$  图解中, 除少数样品落入钾玄岩系列外, 其余样品均落入高钾钙碱性岩系列区域内(图 3b)。那些落入钾玄岩系列的样品, 具有较高的  $K_2O$  含量和烧失量 (LOI), 可能是岩体受到后期蚀变的影响所致。里特曼指数  $\sigma$  值为 2.48%~2.93%, 平均为 2.54 (<3.3), 同样反映出该区岩石属钙碱性系列。(3)  $Al_2O_3$  含量为 15.0%~16.2%,  $A/CNK$  比值为 0.94~1.32,  $A/NK$  比值为 1.33~1.55; 在  $A/NK-A/CNK$  图解中, 大部分样品分布

在准铝-弱过铝质区域(图 3c), 属准铝质-弱过铝质花岗闪长岩。(4)  $CaO$ 、 $MgO$  的含量高, 固结指数 SI 值为 15.1~20.1, 反映出该岩体富含 Ca 和 Mg。值得注意的是, 样品 SKS-30 的  $CaO$ 、 $Na_2O$  含量偏低, 明显偏离其他样品; 样品 SHKSH-3\* 的  $CaO$  和  $K_2O$  含量也明显偏低, 从而导致这两个样品的铝饱和指数(1.32 和 1.34)明显高于其他样品(图 3c), 在  $(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/CaO$  图中, 样品 SKS-30 落入了 FG 区域; 这可能与岩石形成过程中混染作用或后期蚀变作用有关。与湘南其他同熔型花岗岩<sup>[20]</sup>和中国花岗闪长岩<sup>[25]</sup>相比, 水口山花岗闪长岩表现出酸度和碱度偏低, 而富钙镁的特点, 属准铝质-过铝质、高钾钙碱性岩系(表 1)。



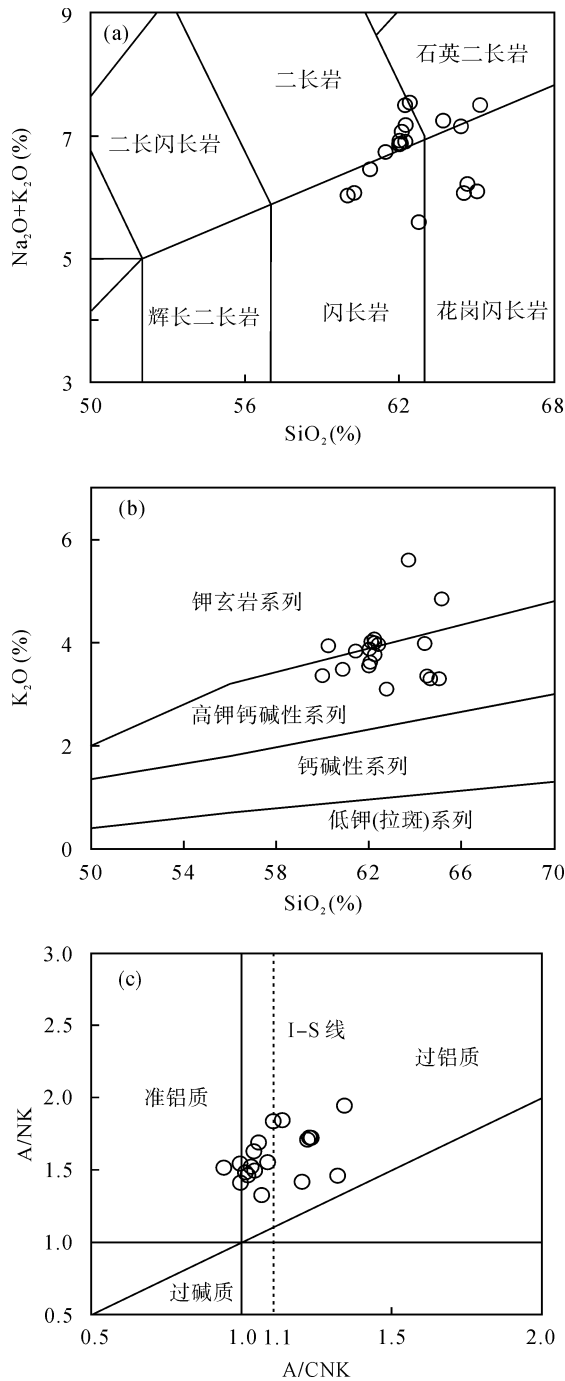


图 3 水口山花岗闪长岩主元素图解

Fig.3 Major elements diagrams for the Shuikoushan granodiorite (a) 底图据文献[26]; (b) 底图据文献[27]; (c) 底图据文献[28].

在 Haker 图解(图 4)中, 随着 SiO<sub>2</sub> 含量的增加, 水口山花岗闪长岩的 MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、CaO 和 FeO 含量明显降低, 而 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量变化不明显。这些成分变化特征很可能与铁镁氧化物及含 Ti-Fe 氧化物等矿物的结晶分异作用有关<sup>[29-31]</sup>。

### 3.2 稀土和微量元素

总体而言, 水口山花岗闪长岩的 REE 含量较高,

$\Sigma$ REE 含量为 154~224  $\mu\text{g/g}$ 。LREE/HREE 比值为 9.59~12.8, 表现出 LREE 富集、HREE 亏损的特点。(La/Yb)<sub>N</sub> = 11.2~13.9, 表明该花岗闪长岩轻、重稀土元素分馏强烈;  $\delta\text{Eu} = 0.82\sim 0.89$ ,  $\delta\text{Ce} = 0.89\sim 0.95$ , Eu 和 Ce 都表现出弱亏损的特点(表 2 和图 5a)。所有样品的球粒陨石标准化曲线大致互相平行且紧密排列, 说明它们起源相同或岩浆演化过程相似。HREE 的亏损可能与角闪石、锆石、磷灰石、独居石等富 MREE、HREE 矿物的分离结晶作用有关, 这与镜下观察到锆石、磷灰石、独居石等副矿物相当发育相吻合。该岩体负 Eu 异常较弱, 反映出岩浆演化过程中斜长石的分离结晶作用不明显。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 所有样品的高场强元素(如 Ta、Nb 和 Ti)亏损, 大离子亲石元素(如 Rb、Th、U 和 K)和 LREE 相对富集, 且 Ba、Sr 相对 Rb 亏损(图 5b)。Nb-Ta 亏损可能与含 Ti 矿物相(如榍石和锐钛矿等)的结晶分异有关。同时, Ti 的亏损程度和 Rb、Th、U、K、La、Nd 和 Sm 的富集程度随着 SiO<sub>2</sub> 含量增加而增强; 且随 SiO<sub>2</sub> 含量增加, Sr 和 Ba 含量明显增加(图 4), Rb/Ba、Rb/Sr 比值逐渐降低。这些微量元素的变化特征与主元素变化特征相吻合。

### 3.3 Sr-Nd 同位素

水口山花岗闪长岩的 Sr-Nd 同位素组成见表 3。该岩体 <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 比值变化较大, 为 0.7339~5.4981, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值为 0.711467~0.723729。<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 比值为 0.1134~0.1520, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值为 0.512219~0.512434。最近我们课题组利用 SIMS 准确测定了该花岗闪长岩中锆石 U-Pb 年龄为(158.3±1.2) Ma(未刊数据), 以该年龄对该岩体的 Sr、Nd 同位素组成进行校正, 可获得 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值为 0.707364~0.711380,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -6.61~-2.40。除了样品 SKS-32 具有年轻的二阶段模式年龄( $t_{2\text{DM}}$ , 1.1 Ga)外, 其他样品的  $t_{2\text{DM}}$  集中在 1.4 Ga 附近。

## 4 讨论

### 4.1 成因类型

水口山花岗闪长岩的主要矿物为石英、黑云母、斜长石、钾长石和角闪石等, 镜下未发现堇青石和白云母等矿物, 符合典型的同熔型花岗岩的矿物组成特征<sup>[35]</sup>。其副矿物主要为磷灰石、磁铁矿和榍石

表 1 水口山花岗岩长岩主元素(%)分析结果  
Table 1 Analytical results of major elements (%) of the Shuikoushan granodiorite

Sample	SKS-6	SKS-15	SKS-16	SKS-29	SKS-30	SKS-31	SKS-32	SKS-33	SKS-35	SKS-36	SKS-37	SKS-50	SHKSH-1*	SHKSH-3*	SHKSH-5*	SHKSH-6*	SHKSH-7*	SHKSH-8*	SHKSH-9*	mean	granodiorites in China
SiO <sub>2</sub>	62.3	62.4	65.2	62.1	63.7	62.3	62.8	62.0	62.0	62.3	62.1	62.2	60.3	60.0	64.7	65.1	60.9	64.5	61.5	62.7	65.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.8	16.0	15.0	15.7	16.2	16.1	15.4	16.1	15.8	15.7	15.5	15.8	17.0	17.5	15.9	15.7	16.3	15.7	16.4	16.0	16.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	6.21	5.09	4.06	6.27	5.04	6.61	5.80	6.51	5.28	6.04	5.66	6.08	5.25	5.36	4.89	4.45	4.82	4.92	4.42	5.38	4.38
FeO	2.35	1.96	1.54	2.50	1.85	2.47	2.10	2.72	2.08	2.30	2.15	2.20	2.96	3.00	2.57	2.63	2.62	2.53	2.41	2.37	2.49
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.64	3.00	2.38	3.59	3.02	3.47	3.54	3.60	3.11	3.52	3.40	3.70	2.29	2.36	2.32	1.82	2.20	2.39	2.01	2.91	1.89
MgO	2.59	2.76	2.09	2.58	3.19	2.58	2.51	2.38	2.29	2.90	2.38	2.46	3.39	3.29	2.34	2.59	3.01	2.59	3.05	2.69	1.94
CaO	3.65	1.50	2.04	3.65	0.87	3.62	4.10	3.30	4.18	3.43	4.64	3.46	4.30	2.98	2.77	2.73	4.27	2.73	4.22	3.28	4.83
Na <sub>2</sub> O	2.91	3.58	2.66	3.06	1.65	3.05	2.50	3.05	3.32	3.42	3.26	3.43	2.14	2.67	2.92	2.80	2.98	2.72	2.90	2.90	5.67
K <sub>2</sub> O	4.00	3.97	4.85	4.02	5.60	4.07	3.10	3.88	3.55	3.77	3.62	4.07	3.94	3.36	3.30	3.30	3.48	3.35	3.84	3.84	2.95
MnO	0.0888	0.0815	0.0593	0.0885	0.0568	0.117	0.106	0.117	0.0670	0.0734	0.0949	0.0781	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.07	0.0730	1.94
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.418	0.282	0.271	0.412	0.337	0.370	0.348	0.365	0.338	0.344	0.343	0.339	0.410	0.350	0.380	0.380	0.370	0.380	0.360	0.360	1.32
TiO <sub>2</sub>	0.701	0.681	0.570	0.704	0.699	0.758	0.707	0.755	0.699	0.702	0.706	0.690	0.780	0.810	0.680	0.700	0.770	0.700	0.740	0.710	0.520
LOI	2.93	2.83	4.71	2.05	3.91	2.00	4.24	3.06	3.63	2.78	3.17	2.82	2.68	3.40	1.85	2.05	2.54	2.17	1.82	2.89	0.290
Total	101.5	99.1	101.5	100.6	101.3	101.5	101.5	101.5	101.1	101.4	101.5	101.5	100.2	99.8	99.8	99.8	99.5	99.8	99.3	100.6	100.0
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	6.91	7.55	7.51	7.07	7.26	7.16	5.60	6.93	6.87	7.18	6.88	7.51	6.08	6.03	6.22	6.10	6.46	6.07	6.74	6.74	8.62
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.37	1.11	1.82	1.31	3.39	1.26	1.24	1.27	1.07	1.10	1.11	1.19	1.84	1.26	1.13	1.18	1.17	1.23	1.32	1.39	0.52
A/CNK	1.03	1.20	1.07	1.01	1.32	1.04	1.11	1.09	1.00	1.02	0.94	1.00	1.13	1.34	1.22	1.23	1.06	1.23	1.04	1.11	0.86
A/NK	1.52	1.42	1.33	1.48	1.46	1.50	1.84	1.55	1.54	1.46	1.52	1.41	1.85	1.94	1.72	1.72	1.69	1.73	1.63	1.60	1.30
SI	16.5	18.9	15.3	16.2	20.6	16.8	18.1	15.1	15.9	18.0	16.0	15.3	23.0	22.4	17.4	19.7	21.1	19.1	21.5	18.2	13.0
$\sigma$	2.48	2.93	2.54	2.62	2.54	2.64	1.59	2.52	2.48	2.68	2.48	2.93	2.14	2.14	1.79	1.69	2.33	1.71	2.46	2.35	3.38

注: A/CNK = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) (摩尔比); A/NK = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) (摩尔比); FeO<sup>T</sup> = 0.9×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> + FeO 和 FeO 采用湿化学方法测定;  $\sigma$  (里特曼指数) = (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)<sup>2</sup>/(SiO<sub>2</sub>-43); SI (固结指数) = MgO×100/(MgO+FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)。中国花岗岩长岩数据引自文献[25]; 带星号数据引自文献[19]。

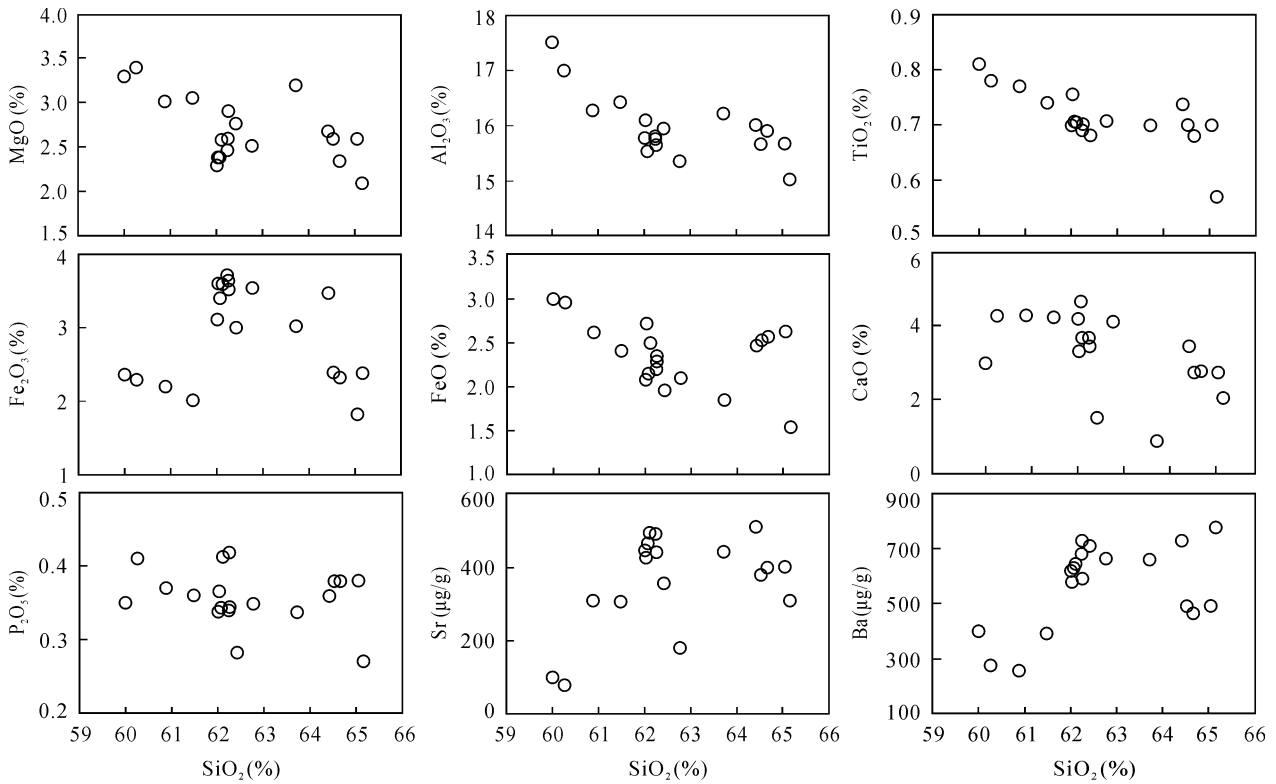


图 4 水口山花岗闪长岩部分主元素和微量元素对 SiO<sub>2</sub> 图解

Fig.4 Variation diagrams of some major elements and trace elements vs. silica for the Shuikoushan granodiorite

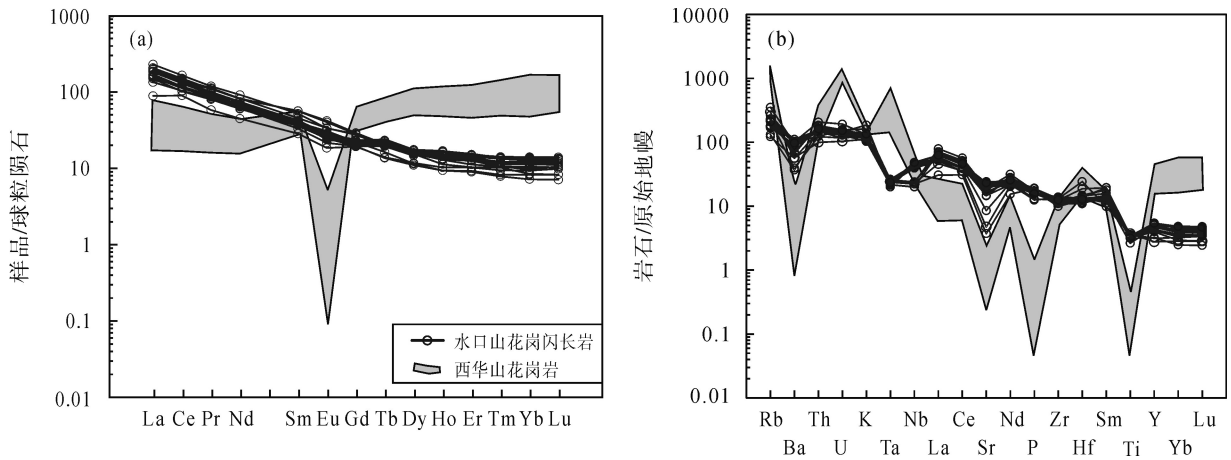


图 5 水口山花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.5 Chondrite-normalized REE diagram (a) and primitive mantle-normalized incompatible element spider diagram (b) for the Shuikoushan granodiorite  
标准值引自文献[33]; 西华山数据引自文献[34]。

等, 与同熔型花岗岩富磁铁矿的富钙组合的副矿物组合特征<sup>[5]</sup>也非常吻合。

陈骏等对南岭地区的与钨锡铌钽矿化有关的改造型花岗岩特征进行了归纳总结, 得出这些花岗岩表现出明显富硅、富碱特征, 并全部落在 SiO<sub>2</sub>-AR 图的碱性区域内<sup>[16]</sup>。而水口山花岗闪长岩则为贫硅、富碱、高钾的钙碱性岩石, 明显有别于南岭地区改造型花岗岩(图 6)。

已有的研究表明<sup>[5]</sup>, 华南改造型花岗岩碱土金属 Sr 含量平均为 159 µg/g, 而同熔型花岗岩的 Sr 含量较高, 为 250~360 µg/g。水口山花岗闪长岩的 Sr 含量为 237~491 µg/g (表 2), 与同熔型花岗岩较吻合。改造型花岗岩的 Rb 含量也远高于同熔型花岗岩, 如西华山和千里山这类改造型花岗岩的稀碱金属 Rb 分别为 508 µg/g 和 783 µg/g, 而同熔型的浙江桐庐二长花岗斑岩和次二长花岗斑岩 Rb 的含量分别

表2 水口山花岗岩闪长岩稀土及微量元素含量(μg/g)及其相关参数

Table 2 Contents of rare earth elements and other trace elements (μg/g) and relevant parameters for the Shuikoushan granodiorite

Sample	SKS-6	SKS-15	SKS-16	SKS-29	SKS-30	SKS-31	SKS-32	SKS-33	SKS-35	SKS-36	SKS-37	SKS-50	SHKSH-1*	SHKSH-3*	SHKSH-5*	SHKSH-6*	SHKSH-7*	SHKSH-8*	SHKSH-9*	
Ga	19.2	18.4	19.8	18.2	19.0	19.6	18.3	19.5	18.7	19.0	18.4	19.7								
Rb	132	168	144	107	147	135	224	116	112	114	112	133	136	189	142	137	84	138	78	
Sr	491	356	309	494	442	510	180	426	446	441	465	491	78.6	100	399	401	309	379	306	
Y	24.6	24.0	21.2	23.9	23.0	24.8	24.4	21.4	21.4	22.9	23.9	24.7	14.3	12.6	14.6	18.1	19.3	18.9	19.6	
Zr	132	139	152	136	133	124	156	130	151	129	127	141	146	126	111	130	139	133	133	
Nb	34.0	31.7	29.6	30.0	29.8	32.5	31.6	28.1	30.5	31.9	30.6	34.6	15.9	16.2	16.6	16.4	14.2	17.1	14.3	
Ba	729	710	777	645	660	729	664	579	619	591	630	681	276	400	465	492	257	491	392	
La	43.0	44.3	40.2	36.6	37.2	36.6	38.8	35.2	38.3	39.2	37.4	43.0	21.1	31.8	48.8	54.4	46.9	48.9	46.5	
Ce	79.1	78.9	72.1	68.5	68.7	69.3	71.6	62.5	70.9	72.2	70.1	81.7	54.9	63.4	86.5	101	88.2	92.0	84.1	
Pr	9.30	8.92	8.14	8.09	8.15	8.49	8.54	7.58	8.35	8.62	8.44	9.50	5.52	7.80	9.43	11.3	10.7	10.4	10.4	
Nd	34.0	31.8	29.6	30.0	29.8	32.5	31.6	28.1	30.5	31.9	30.6	34.6	20.9	28.5	34.8	42.7	38.2	38.3	37.8	
Sm	6.38	5.94	5.57	5.74	5.84	6.44	6.16	5.49	5.63	6.13	5.99	6.49	4.36	5.07	6.07	7.97	8.61	6.99	8.66	
Eu	1.66	1.58	1.41	1.52	1.53	1.63	1.36	1.43	1.46	1.49	1.49	1.63	1.07	1.25	1.78	1.94	2.32	1.95	2.43	
Gd	4.82	4.54	4.09	4.29	4.41	4.69	4.50	4.00	4.05	4.21	4.23	4.70	3.95	4.02	4.54	5.80	5.79	5.66	5.99	
Tb	0.870	0.813	0.737	0.786	0.799	0.848	0.860	0.725	0.757	0.830	0.841	0.899	0.520	0.510	0.610	0.750	0.730	0.730	0.770	
Dy	4.39	4.08	3.75	4.06	4.01	4.27	4.43	3.72	3.73	4.17	4.45	4.45	2.98	2.79	32.91	3.90	3.88	3.95	4.06	
Ho	0.937	0.918	0.813	0.866	0.844	0.921	0.950	0.804	0.817	0.920	0.943	0.959	0.580	0.530	0.530	0.640	0.740	0.730	0.760	
Er	2.50	2.43	2.16	2.33	2.27	2.45	2.57	2.09	2.15	2.43	2.50	2.51	1.70	1.53	1.48	1.71	2.08	1.85	2.08	
Tm	0.353	0.347	0.308	0.340	0.311	0.338	0.352	0.289	0.300	0.349	0.361	0.354	0.240	0.210	0.200	0.260	0.270	0.270	0.270	
Yb	2.30	2.34	2.11	2.24	2.02	2.19	2.26	1.92	1.97	2.28	2.39	2.38	1.59	1.40	1.22	1.44	1.74	1.64	1.79	
Lu	0.338	0.343	0.312	0.336	0.298	0.329	0.334	0.282	0.295	0.332	0.355	0.346	0.250	0.210	0.180	0.210	0.260	0.270	0.260	
Hf	3.69	4.00	4.01	3.76	3.49	3.37	4.11	3.69	4.12	3.82	3.71	3.95	7.48	4.10	3.92	4.58	5.79	4.49	4.29	
Ta	0.919	1.08	1.05	0.958	0.897	0.819	0.871	0.951	0.909	0.982	0.961	0.961	0.970	0.990	1.01	1.04	0.89	1.06	0.89	
Th	13.3	17.6	13.1	12.7	12.4	10.4	12.3	13.5	12.5	14.1	13.2	13.8	10.5	8.5	15.7	15.0	13.1	15.4	12.5	
U	2.97	4.04	3.29	3.27	3.05	2.45	2.71	3.16	2.96	3.32	2.84	3.19	3.27	2.18	3.16	3.15	2.70	3.29	2.43	
ΣREE	190	187	171	166	166	171	174	154	169	175	170	194	120	149	199	234	210	214	206	
LREE	174	171	157	150	151	155	158	140	155	160	154	177	108	138	187	219	195	199	190	
HREE	16.5	15.8	14.3	15.3	15.0	16.0	16.2	13.8	14.1	15.5	16.1	16.6	11.8	11.2	11.7	14.7	15.5	15.2	16.0	
LREE/HREE	10.5	10.8	11.0	9.9	10.1	9.7	9.7	10.2	11.0	10.3	9.6	10.7	9.1	12.3	16.1	14.9	12.6	13.1	11.9	
(La/Yb) <sub>N</sub>	13.4	13.6	13.7	11.7	13.2	12.0	12.3	13.2	13.9	12.3	11.2	13.0	9.5	16.3	28.7	27.1	19.3	21.4	18.6	
δEu	0.88	0.89	0.86	0.89	0.88	0.86	0.76	0.89	0.89	0.85	0.86	0.86	0.77	0.82	0.99	0.83	0.95	0.92	0.98	
δCe	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.92	0.89	0.93	0.92	0.93	0.95	1.22	0.96	0.93	0.95	0.93	0.95	0.9	
Rb/Ba	0.18	0.24	0.19	0.17	0.22	0.18	0.34	0.20	0.18	0.19	0.18	0.19	0.49	0.47	0.31	0.28	0.33	0.28	0.20	
Rb/Sr	0.27	0.47	0.47	0.22	0.33	0.26	1.25	0.27	0.25	0.26	0.24	0.27	1.73	1.90	0.36	0.34	0.27	0.36	0.25	
Zr/Hf	35.7	34.8	37.9	36.2	38.2	36.9	38.0	35.3	36.6	33.7	34.3	35.6	19.5	30.7	28.3	28.4	24.0	29.6	31.0	
Nb/Ta	37.0	29.4	28.2	31.3	33.1	39.6	36.3	29.5	33.5	32.5	31.9	36.0	16.4	16.4	16.4	15.8	16.0	16.1	16.1	
Zr+Nb+Ce+Y	269	274	275	258	255	282	284	242	273	256	252	282	231	218	229	266	261	261	251	
10000Ga/Al	2.30	2.18	2.48	2.19	2.21	2.31	2.25	2.29	2.23	2.29	2.23	2.35								
T <sub>Zr</sub> (°C)	755	805	800	755	816	756	766	762	757	755	730	761	760	778	768	782	752	783	750	

注: 带星号数据引自文献[19]。锆石饱和温度 T<sub>Zr</sub>(°C)根据文献[32]方法计算。



表 3 水口山花岗闪长岩的 Sr-Nd 同位素组成  
Table 3 Sr-Nd isotopic compositions for the Shuikoushan granodiorite

Sample	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{2\text{DM}}(\text{Ma})$
SKS-6	0.7783	0.711854	6	0.710128	82.51	0.1134	0.512231	5	0.512114	-6.29	1457
SKS-31	0.7645	0.71182	9	0.710124	82.46	0.1199	0.512255	3	0.512131	-5.95	1430
SKS-32	3.6129	0.715479	7	0.707364	44.73	0.1177	0.512434	19	0.512312	-2.40	1142
SKS-36	0.7493	0.711845	7	0.710161	83.29	0.1162	0.512241	3	0.512121	-6.14	1445
SKS-50	0.7819	0.711867	7	0.710111	82.59	0.1134	0.512248	15	0.512131	-5.96	1430
SHKSH-1*	5.012	0.721045	20	0.709788	79.70	0.138	0.512253	8	0.512110	-6.34	1462
SHKSH-3*	5.4981	0.723729	25	0.711380	102.51	0.118	0.512219	12	0.512097	-6.61	1483
SHKSH-7*	0.7867	0.711467	20	0.709700	76.75	0.15	0.512272	10	0.512117	-6.21	1451
SHKSH-9*	0.7339	0.711527	14	0.709879	79.27	0.152	0.51228	11	0.512123	-6.10	1442

注: 带星号数据引自文献[19]。

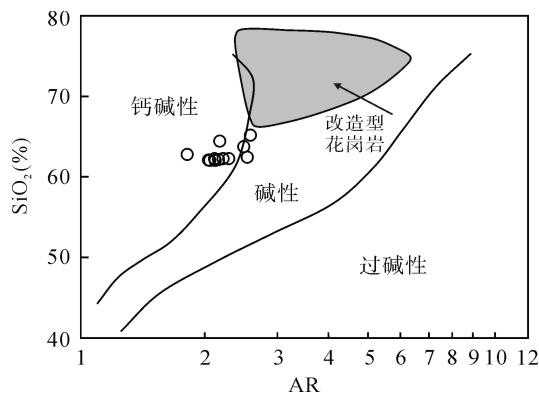


图 6 水口山花岗闪长岩  $\text{SiO}_2$ -AR 图

Fig. 6  $\text{SiO}_2$  vs. AR variation diagram for the Shuikoushan granodiorite  
改造型花岗岩数据引自文献[16]; 底图引自文献[36]。

为  $163 \mu\text{g/g}$  和  $200 \mu\text{g/g}$  [5]。水口山花岗闪长岩 Rb 的含量为  $107\sim 224 \mu\text{g/g}$  (表 2), 具同熔型花岗岩的 Rb 含量特征。

与典型的西华山改造型花岗岩 [34] 进行对比, 不难发现, 水口山花岗闪长岩的重稀土含量明显低于改造型花岗岩, 其弱负 Eu 异常及 LREE/HREE 比值也与改造型花岗岩明显不同 (图 5a), 而与同熔型花岗岩特征相似。同样, 水口山花岗闪长岩的 Ba、Sr、Ti 等元素的亏损程度及 Rb、Th、U 等大离子亲石元素的富集程度没有西华山改造型花岗岩明显 (图 5b), 而与同熔型花岗岩特征相似。

徐克勤等 [5] 的研究表明, 华南同熔型花岗岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值均较低, 一般为  $0.705\sim 0.712$ , 而该区改造型花岗岩具有较高的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值, 为  $0.722\sim 0.735$ 。本次得到的水口山花岗闪长岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值 ( $0.7097\sim 0.7101$ ) 落于同熔型花岗岩的 Sr 同位素的组成范围。

水口山所有花岗闪长岩样品都具有较小的

$10000\text{Ga}/\text{Al}$  变化范围, 在  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Ga}/\text{Al}$  图解、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}-\text{Ga}/\text{Al}$  图解、 $\text{Zr}-\text{Ga}/\text{Al}$  图解和  $\text{Y}-\text{Ga}/\text{Al}$  图解中均远离 A 型花岗岩而落入 M-、I-和 S-型花岗岩区域 (图 7), 表明其不是 A 型花岗岩。此外, 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$  图解中落入 I 型花岗岩范围内 (图 8)。 $\text{FeO}^T/\text{MgO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  图解和  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  图解被认为是判别高度分异 I 型花岗岩的有效方法 [30]; 水口山花岗闪长岩的样品, 除样品 SKS-30 外, 全部落入 OGT 范围内 (图 7), 表明其不是高度分异型的 I 型花岗岩。

总之, 水口山花岗闪长岩在主要矿物组成、副矿物组成、碱金属元素、稀碱元素、主元素、微量元素和同位素等方面均符合同熔型花岗岩的基本特征, 且各种成因判别图解也表明其为 I 型花岗岩, 即徐克勤等 [5] 划分的同熔型花岗岩。

#### 4.2 源区性质

水口山花岗闪长岩的微量元素 Nb/Ta 比值为  $29.4\sim 39.6$ , 远大于亏损地幔的相应值 ( $>17.0$ ) [33], 暗示有地幔的参与; 且该岩体的 Zr/Hf 比值为  $33.7\sim 38.2$  (平均  $36.1$ ), 接近于地幔平均值  $36.5$  [39], 也说明有幔源物质参与了其成岩作用。

根据前人已有的资料 [40] 进行计算, 我们得到华夏地块变质基底的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t=158 \text{ Ma})$  值为  $-14.37$ , 江南古陆变质基底的  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  值 ( $t=158 \text{ Ma}$ ) 为  $-7.68$ 。很明显, 水口山花岗闪长岩的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $-6.61\sim -2.40$ ), 明显高于华南的古老基底变质岩, 故幔源物质应参与了其成岩作用。同时, 我们以典型的壳源型花岗岩广西大容山堇青石花岗岩来代表华南上地壳端元 [41], 以 MORB 来代表亏损地幔端元 [39], 根据 Faure 提出的

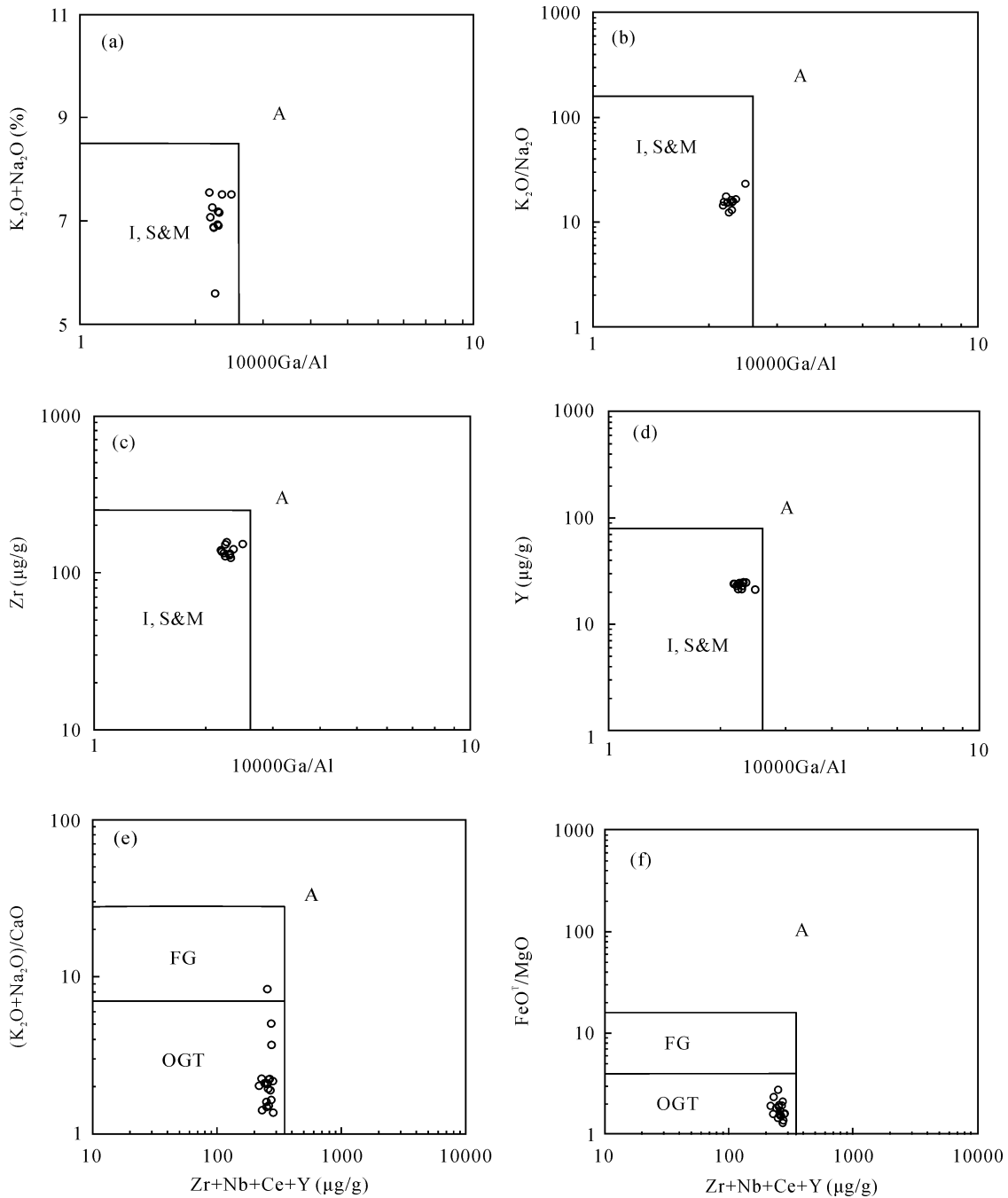


图7 水口山花岗闪长岩的  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  (a),  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (b),  $\text{Zr}$  (c),  $\text{Y}$  (d) vs.  $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$  和  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$  (e),  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  (f) vs.  $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  判别图解(底图据文献[37])

Fig.7 Discrimination diagrams of  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  (a),  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{MgO}$  (b),  $\text{Zr}$  (c),  $\text{Y}$  (d) vs.  $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$  and  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$  (e),  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}/\text{MgO}$  (f) vs.  $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  for the Shuikou granite

I-I 型花岗岩; S-S 型花岗岩; A-A 型花岗岩; FG-分异的长英质花岗岩; OGT-未分异的 I 型、S 型、M 型花岗岩。

简单二元混合方程<sup>[39]</sup>进行了简单理论模拟, 最终拟合出如图 9 所示的混合曲线。可以看出该岩体的 Sr-Nd 同位素组成呈负相关(图 9), 与湘南地区铜山岭和宝山的花岗闪长岩一起全部落于华南上地壳和 MORB 的混合线附近, 且较靠近上地壳端元, 表现出岩浆混合的特征。因此, Sr-Nd 同位素数据也

表明, 水口山花岗闪长岩应为华南地壳物质和地幔物质混合作用形成。

根据 Watson *et al.* 提出的锆石饱和和温度计算方法<sup>[32]</sup>, 我们可求出水口山花岗闪长岩的母岩浆的锆石饱和温度为  $730\sim 816\text{ }^\circ\text{C}$ (表 2), 明显高于西华山花岗岩( $702\sim 748\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[34]</sup>), 而与宝山花岗闪长岩

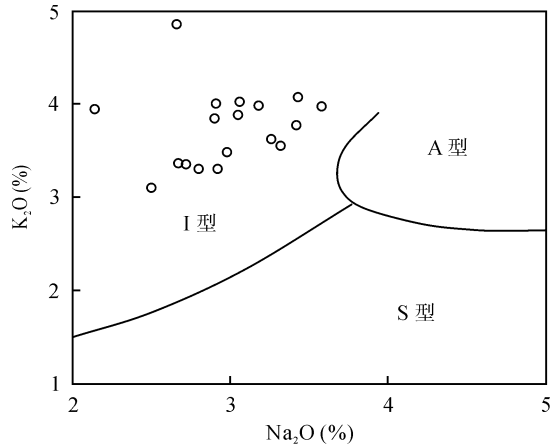


图 8 水口山花岗闪长岩 K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O 图解  
(底图据文献[38])

Fig.8 K<sub>2</sub>O vs. Na<sub>2</sub>O variation diagram for the Shuikoushan granodiorite

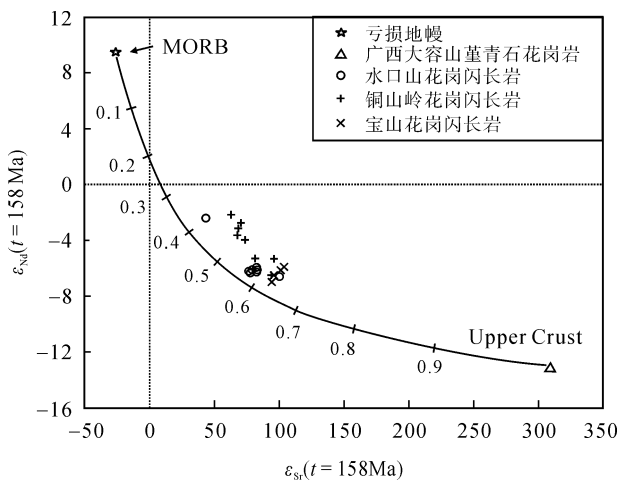


图 9 水口山花岗闪长岩的 Sr-Nd 同位素图解

Fig.9  $\epsilon_{Nd}(t)$  vs.  $\epsilon_{Sr}(t)$  diagram for the Shuikoushan granodiorite  
广西大容山董青石花岗岩代表华南上地壳<sup>[41]</sup>, MORB 代表亏损地幔<sup>[39]</sup>,  
铜山岭、宝山数据引自文献[19], 所有数据均校正到了  $t = 158$  Ma.

(724~778 °C<sup>1</sup>)相似。另外, 水口山矿田可见一些幔源岩浆岩或幔源包体, 如在老盟山深部钻孔曾揭露到辉长橄橄榄岩<sup>2)</sup>; 在本次研究中, 我们亦在老盟山英安玢岩中发现有橄橄榄岩包体(图 10)。

因此, 微量元素特征、Sr-Nd 同位素特征、锆石饱和温度和深源包体均表明, 幔源物质在水口山花岗闪长岩形成过程中的确发挥了重要的作用。

### 4.3 成岩的构造环境

目前, 对华南中生代的构造背景的认识主要有以



图 10 老盟山英安玢岩及暗色包体

Fig.10 Hand specimen of dacite-porphyrite with a dark enclave from Laomengshan of Shuikoushan granodiorite

下几种观点: (1) Andean 型活动大陆边缘环境<sup>[29,42,43]</sup>; (2) 岩石圈拆沉或伸展-减薄的环境<sup>[44-45]</sup>; (3) 地幔柱活动<sup>[46]</sup>; (4) 与俯冲作用相关的岩浆弧环境<sup>[47]</sup>。

最新研究表明, 在中、晚侏罗世之交发生了古太平洋板块对欧亚大陆板块的俯冲<sup>[48]</sup>, 从而诱使华南处于伸展构造背景, 发生了燕山早期的板内岩浆活动<sup>[6,17,29]</sup>。华南存在大量的晚侏罗-晚白垩世(J<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>)伸展构造的岩石学证据, 如大规模岩墙群、岩浆混合现象、链状巨型火山岩带、A 型、碱性、晶洞花岗岩带、变质核杂岩带等<sup>[49]</sup>, 表明晚中生代华南的确处于伸展应力环境。Gilder *et al.*<sup>[44]</sup>、Chen *et al.*<sup>[50]</sup>和洪大卫等<sup>[51]</sup>在华南内部识别出几条高  $\epsilon_{Nd}$ 、低  $t_{DM}$  的花岗岩带(十-杭带或钦-杭带), 这种高  $\epsilon_{Nd}$ 、低  $t_{DM}$  带被认为是岩石圈伸展和壳幔之间强烈相互作用的证据。而且钦-杭成矿带很可能是扬子地块和华夏地块的碰撞拼接带<sup>[51]</sup>。而湘南的水口山、宝山和铜山岭正好位于钦-杭构造带的中段, 在这些地方出现的板内岩浆活动很可能以钦-杭带为通道上涌, 并底侵上地壳与地壳物质混合形成。李晓峰等<sup>[52]</sup>最近也认为华南地区与同熔型花岗岩有关的铜铅锌成矿作用是壳幔相互作用的结果。

因此, 笔者认为, 水口山花岗闪长岩的形成是由于在晚中生代太平洋板块对欧亚板块俯冲作用过程中, 诱发了华南板块处于板内伸展-减薄的构造应力环境, 由减压熔融产生的玄武质岩浆通过钦-杭带上涌, 并底侵上地壳, 引发水口山地区玄武质岩浆与地壳物质的相互作用所致。

1) 用文献[19]的数据, 以文献[32]的方法计算。

2) 全铁军, 曾维平, 水口山矿田找矿历史回顾及新一轮老矿山找矿方向, 国土资源导刊, 2006, 3(3), 70-73。

## 5 结 论

(1) 湖南水口山花岗闪长岩富  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3^T$ 、 $MgO$ ，贫  $SiO_2$ ，属准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性岩系。

(2) 水口山花岗闪长岩为 LREE 富集型，轻重稀土明显分馏，LREE 分异程度大于 HREE，弱 Eu 和 Ce 亏损。微量元素 Ba、Ta、Nb、Sr、Ti 亏损，而 Rb、Th、U、K、LREE 相对富集。

(3) 矿物组成、主元素、微量元素和同位素组成等特征均指示，水口山花岗闪长岩为一典型的同熔型花岗岩。

(4) 水口山花岗闪长岩的微量元素、Sr-Nd 同位素组成、锆石饱和温度和深源包体等均暗示其成岩过程中有幔源物质的参与，理论模拟计算也证实了这点。

(5) 水口山花岗闪长岩形成于板内伸展-减薄的构造环境中，是由幔源岩浆上涌底侵上地壳，并与上地壳物质发生壳-幔混合作用所致。

野外工作得到了湖南省水口山有色金属集团有限公司屈金宝、左昌虎和王继国等工程师的大力支持；实验过程中得到了中国科学院地球化学研究所胡静、包广萍、黄艳和杨淑勤老师和天津地质矿产研究所刘卉老师的热情帮助；匿名审稿人的建设性意见对完善本文很有价值，在此一并表示感谢！

### 参考文献(References):

- [1] 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 300-308.  
Hua Ren-min, Mao Jing-wen. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China [J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4): 300-308 (in Chinese with English abstract).
- [2] Hsu Ke-chen. Tungsten deposits of Southern Kiangsi, China [J]. Econ Geol, 1943, 38(6): 431-474.
- [3] 中国科学院贵阳地球化学研究所. 华南花岗岩类的地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-421.  
Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Geochemistry of Granitoids in Southern China [M]. Beijing: Science Press, 1979: 1-421 (in Chinese).
- [4] 莫柱荪, 叶伯丹, 潘维祖. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 1-363.  
Mo Zhu-sun, Ye Bo-dan, Pan Wei-zu. Geology of Nanling Granites [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 1-363 (in Chinese).
- [5] 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 张景荣, 叶俊. 论花岗岩的成因系列——以华南中生代花岗岩为例[J]. 地质学报, 1983, 57(2): 97-106.  
Xu Ke-qin, Hu Shou-xi, Sun Ming-zhi, Zhang Jing-rong, Ye Jun. On the genetic series of granites, as exemplified by the Mesozoic granites of South China [J]. Acta Geol Sinica, 1983, 57(2): 97-106 (in Chinese with English abstract).
- [6] 周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 179-195.  
Zhou Xin-min. Genesis of Granite and Lithospheric Dynamics Evolution of Late Mesozoic in Nanling [M]. Beijing: Science Press, 2007: 179-195 (in Chinese).
- [7] 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 叶俊. 华南两个成因系列花岗岩类及其成矿特征[J]. 矿床地质, 1982, 1(2): 1-14.  
Xu Ke-qin, Hu Shou-xi, Sun Ming-zhi, Ye Jun. On the two genetic series of granites in South Eastern China and their metallogenetic characteristics [J]. Mineral Deposits, 1982, 1(2): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- [8] Chappel B W, White A J R. Two contrasting granite types [J]. Pac Geol, 1974, 8: 173-174.
- [9] Ishihara S. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks [J]. Min Geol, 1977, 27(145): 293-305.
- [10] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites [J]. Geol Soc Am Abs Prog, 1979, 11(7): 468.
- [11] 李洪昌, 唐先礼. 南岭地区地洼期酸性、中酸性小岩体特征及其与铅锌矿的关系[J]. 大地构造与成矿学, 1987, 11(3): 259-264.  
Li Hong-chang, Tang Xian-li. Characteristics of the small acid and intermediate-acid intrusive bodies in Diwa stage of Nanling region and their relation to lead-zinc deposits [J]. Geotecton Metallogen, 1987, 11(3): 259-264 (in Chinese with English abstract).
- [12] 朱焱龄, 李崇佑, 林运淮. 赣南钨矿地质[M]. 南昌: 江西人民出版社, 1981: 1-440.  
Zhu Yan-ling, Li Chong-you, Lin Yun-huai. Geology of Tungsten Deposits in Southern Jiangxi Province [M]. Nanchang: Jiangxi People's Press, 1981: 1-440 (in Chinese).
- [13] 冶金部南岭钨矿专题组. 华南钨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 1-496.  
Special Team on Nanling Tungsten Deposits of the Ministry of Metallurgy. Tungsten Deposits in South China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 1-496 (in Chinese).
- [14] 卢焕章. 华南钨矿成因[M]. 重庆: 重庆出版社, 1986: 1-232.  
Lu Huan-zhang. Ore Geneses of Tungsten Deposits in South China [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1986: 1-232 (in Chinese).
- [15] 陈毓川, 裴荣富, 张宏良. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-507.  
Chen Yu-chuan, Pei Rong-fu, Zhang Hong-liang. The Geology of Nonferrous and Rare Metal Deposits Related to Mesozoic Granitoids in the Nanling Region, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1-507 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 王汝成, 马东升, 朱金初, 张文兰,

- 季峻峰. 南岭地区钨锡铋钼花岗岩及其成矿作用[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 459–473.
- Chen Jun, Lu Jian-jun, Chen Wei-feng, Wang Ru-cheng, Ma Dong-sheng, Zhu Jin-chu, Zhang Wen-lan, Ji Jun-feng. W-Sn-Nb-Ta-bearing granites in the Nanling range and their relationship to metallogenesis [J]. *Geol J China Univ*, 2008, 14(4): 459–473 (in Chinese with English abstract).
- [17] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾晟彦. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 291–304.
- Hua Ren-min, Chen Pei-rong, Zhang Wen-lan, Yao Jun-ming, Lin Jin-fu, Zhang Zhan-shi, Gu Sheng-yan. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range [J]. *Geol J China Univ*, 2005, 11(3): 291–304 (in Chinese with English abstract).
- [18] 朱金初, 沈渭洲, 刘昌实, 徐士进. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 1990, 9(2): 97–105.
- Zhu Jin-chu, Shen Wei-zhou, Liu Chang-shi, Xu Shi-jin. Nd-Sr isotopic characteristics and genetic discussion of Mesozoic granitoids of synexis series in South China [J]. *Acta Perol Mineral*, 1990, 9(2): 97–105 (in Chinese with English abstract).
- [19] Wang Yue-jun, Fan Wei-ming, Guo Feng. Geochemistry of early Mesozoic potassium-rich diorites-granodiorites in Southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Geochem J*, 2003, 37(4): 427–448.
- [20] 庄锦良, 刘钟伟, 谭必祥, 江鹏程, 贺安生. 湘南地区小岩体与成矿关系及隐伏矿床预测[J]. 湖南地质, 1988, 4(4): 1–202.
- Zhuang Jin-liang, Liu Zhong-wei, Tan Bi-xiang, Jiang Peng-cheng, He An-sheng. Relation of the small rock bodies in southern Hunan to the formation of ore deposits and prognosis of concealed deposits [J]. *Hunan Geol*, 1988, 4(4): 1–202 (in Chinese with English abstract).
- [21] 喻亨祥, 刘家远. 水口山矿田花岗质潜火山杂岩的成因特征[J]. 大地构造与成矿学, 1997, 21(1): 32–40.
- Yu Heng-xiang, Liu Jia-yuan. The characteristic and petrogenesis of the granitic subvolcanic complex in the Shuikoushan orefield [J]. *Geotecton Metallogen*, 1997, 21(1): 32–40 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李能强, 彭超. 湖南水口山铅锌金银矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1996: 1–103.
- Li Neng-qiang, Peng Chao. Shuikoushan Lead-Zinc-Gold-Silver Orefield, Hunan, China [M]. Beijing: Seismological Press, 1996: 1–103 (in Chinese).
- [23] Qi Liang, Hu Jing, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507–513.
- [24] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459–464.
- Lu Yuan-fa. Geokit — A geochemical toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 459–464 (in Chinese with English abstract).
- [25] 黎彤, 饶纪龙. 中国岩浆岩的平均化学成分[J]. 地质学报, 1963, 43(3): 271–280.
- Li Tong, Rao Ji-long. The average chemical composition of igneous rocks in China [J]. *Acta Geol Sinica*, 1963, 43(3): 271–280 (in Chinese with English abstract).
- [26] Middlemost E A. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth Sci Rev*, 1994, 37(3): 215–224.
- [27] Peccerillo A, Taylor S. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1976, 58(1): 63–81.
- [28] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101(5): 635–643.
- [29] Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, Li Wu-xian, Liu Ying, Yuan Chao, Wei Guang-jian, Qi Chang-shi. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 186–204.
- [30] Wu Fu-yuan, Jahn Borming, Simon A W, Lo Chinghua, Yui Tzenfu, Lin Qiang, Ge Wen-chun, Sun De-you. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 2003, 66(3): 241–273.
- [31] Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, Li Chiyu, Chen Zhenghong, Yu Jinsheng, Gui Xuntang. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: Petrology and geochemistry [J]. *Chinese Sci Bull*, 2000, 45(7): 653–659.
- [32] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1983, 64(2): 295–304.
- [33] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geol Soc London Spec Pub*, 1989, 42(1): 313–345.
- [34] Yang Jiehua, Peng Jiantang, Zhao Junhong, Fu Yazhou, Yang Chen, Hong Yinglong. Petrogenesis of the Xihuashan granite in Southern Jiangxi Province, South China: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd isotopes [J]. *Acta Geol Sinica (Engl Ed)*, 2012, 86(1): 131–152.
- [35] Pitcher W S. Granite type and tectonic environment [C]//Hsu K. Mountain Building Processes. London: Academic Press, 1983: 19–40.
- [36] Wright J. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis [J]. *Geol Mag*, 1969, 106(4): 370–384.
- [37] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95(4): 407–419.
- [38] Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Can J Earth Sci*, 1982, 80(2): 189–200.
- [39] Faure G. Principles of Isotope Geology [M]. 2nd ed. S.I.: Wiley, 1986: 200–249.
- [40] 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 徐士进, 凌洪飞. 华南基底变质

- 岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约[J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 115-124.
- Shen Wei-zhou, Zhu Jin-chu, Liu Chang-shi, Xu Shi-jin, Ling Hong-fei. Sm-Nd isotopic study of basement metamorphic rocks in South China and its constraint on material sources of granitoids [J]. Acta Petrol Sinica, 1993, 9(2): 115-124 (in Chinese with English abstract).
- [41] 于津生, 桂训唐, 袁超. 广西大容山花岗岩套同位素地球化学特征[J]. 广西地质, 1999, 12(3): 1-6.
- Yu Jin-sheng, Gui Xun-tang, Yuan Chao. The characteristics of isotopes geochemistry of Darongshan granitoid suite, Guangxi [J]. Guangxi Geol, 1999, 12(3): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [42] Zhou Xin-min, Sun Tao, Shen Wei-zhou, Shu Liang-shu, Niu Yao-ling. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. Episodes, 2006, 29(1): 26-33.
- [43] Wang, Fang-yue, Ling Ming-xing, Ding Xing, Hu Yan-hua, Zhou Ji-bin, Yang Xiao-yong, Liang Hua-ying, Fan Wei-ming, Sun Wei-dong. Mesozoic large magmatic events and mineralization in SE China: Oblique subduction of the Pacific plate [J]. Int Geol Rev, 2011, 53(5/6): 704-726.
- [44] Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao Xi-xi, Liu Zhong-wei, Wang Gen-xian, Yuan Kui-rong, Liu Wen-long, Kuang Guo-dun, Wu Hao-ruo. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China [J]. J Geophys Res: Solid Earth (1978-2012), 1996, 101(B7): 16137-16154.
- [45] 马丽艳, 路远发, 梅玉萍, 陈希清. 湖南水口山矿区花岗闪长岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2475-2482.
- Ma Li-yan, Lu Yuan-fa, Mei Yu-ping, Chen Xi-qing. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite from Shuikoushan ore-field, Hunan province and its geological significance [J]. Acta Petrol Sinica, 2006, 22(10): 2475-2482 (in Chinese with English abstract).
- [46] Deng J F, Mo X X, Zhao H L, Wu Z X, Luo Z H, Su S G. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'Continental roots-plume tectonics' [J]. Earth Sci Rev, 2004, 65(3): 223-275.
- [47] 汪洋. 湘南早中侏罗世花岗闪长岩的岩石化学特征、构造背景及地质意义[J]. 北京地质, 2003, 15(3): 1-7.
- Wang Yang. The early mid-Jurassic granodiorite in South Hunan — It's petrochemical characteristics, tectonic setting and geological implication [J]. Beijing Geol, 2003, 15(3): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [48] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 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]. 地学前缘, 2009, 16(1): 234-247.
- Zhang Yue-qiao, Xu Xian-bing, Jia Dong, Shu Liang-shu. 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 Sci Front, 2009, 16(1): 234-247 (in Chinese with English abstract).
- [49] 孙涛, 陈培荣, 周新民. 中国东南部晚中生代伸展应力体制的岩石学标志[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2002, 38(6): 737-746.
- Sun Tao, Chen Pei-rong, Zhou Xin-min. Late Mesozoic extension in Southeast China: Petrologic symbols [J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 2002, 38(6): 737-746 (in Chinese with English abstract).
- [50] Chen Jiang-feng, Jahn Bor-ming. Crustal evolution of South-eastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. Tectonophysics, 1998, 284(1): 101-133.
- [51] 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 试析杭州-诸广山-花山高  $e_{Nd}$  值花岗岩带的地质意义[J]. 地质通报, 2002, 21(6): 348-354.
- Hong Da-wei, Xie Xi-lin, Zhang Ji-sheng. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high- $e_{Nd}$  granite belt [J]. Geol Bull China, 2002, 21(6): 348-354.
- [52] 李晓峰, 胡瑞忠, 华仁民, 马东升, 武丽艳, 齐有强, 彭建堂. 华南中生代与同熔型花岗岩有关的铜铅锌多金属矿床时空分布及其岩浆源区特征[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4037-4050.
- Li Xiao-feng, Hu Rui-zhong, Hua Ren-min, Ma Dong-sheng, Wu Li-yan, Qi You-qiang, Peng Jian-tang. The Mesozoic syntaxis type granite-related Cu-Pb-Zn mineralization in South China [J]. Acta Petrol Sinica, 2012, 29(12): 4037-4050 (in Chinese with English abstract).