

# 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义\*

汪洋<sup>1,2</sup> 邓晋福<sup>2</sup> 姬广义<sup>3</sup>

WANG Yang<sup>1,2</sup>, DENG JinFu<sup>2</sup> and JI GuangYi<sup>3</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 北京市地质研究所, 北京 100011

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

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Geological Institute of Beijing Municipality, Beijing 100011, China

2003-07-10 收稿, 2003-11-03 改回.

Wang Y, Deng JF and Ji GY. 2004. A perspective on the geotectonic setting of early Cretaceous adakite-like rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and its significance for copper-gold mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):297-314

**Abstract** The Lower Reaches of Yangtze River (LRYR) is one of the major copper resource bases in China. Extensive magmatism occurred in the region during Early Cretaceous epoch, and is strongly related to the copper-gold mineralization. The most ore-forming related intermediate-acid intrusive rocks exhibit the geochemical features with adakite affinity, which contains high s but low HREE (e.g. Y and Yb). However, these rocks have negative  $\varepsilon_{Nd}(t)$  values and more enriched ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> values ( $> 0.704$ ); therefore, they are called as adakite-like rocks. According to the petrochemical data, the adakite-like plutons belong to high-K calc-alkaline series, but some belong to calc-alkaline series. Meanwhile, the volcanic rocks and A-type granitoid plutons belong to potassic alkaline series due to their high potassium abundance and iron enrichment. The complex petrogenetic processes were suggested from the analysis of geochemical data. To form the ore-forming related adakite-like pluton, two-stage evolution is required. The parental magma evolved to the potash-rich mafic magma by fractional crystallization in the deep-level magma chamber ( $> 35 \sim 40$  km in depth). The evolved magma further experienced fractional crystallization (FC) or assimilation and fractional crystallization (AFC) process with crustal materials in high-level chamber. However, it is possible that some adakitic melt generated by melting of basaltic lower crust involved in the petrogenetic process. The potash-rich volcanic rocks were formed by fractional crystallization of mafic minerals in deep-level chamber ( $> 40 \sim 50$  km in depth). On the comprehensive analysis of regional tectonics, geochemical characteristics of igneous rocks, and the temporal-spatial variation of magmatism, active continental arc was identified as the geotectonic setting for the LRYR and its southeastern surrounding regions. The LRYR lies in the inland portion of the arc during the early stage, and the magmatism in LRYR was related to the oblique subduction of Izanagi plate. In the late stage of Early Cretaceous, the back-arc feature magmatic rocks occurred in LRYR were due to the post-orogenic collapse triggered by slab migration (steepening). The supercritical fluid released from the upper parts of subducted slabs, promoted oxidation of mantle wedge and the release of copper, gold and iron to parental magma. Meanwhile, the AFC process in high-level chamber favors the release of gold, copper-bearing magmatic fluids. Therefore, the copper-gold metallogenesis in LRYR should be considered as a consequence of Mesozoic plate subduction beneath Asian continent.

**Key words** Adakite-like rocks, Rock series, Geotectonic setting, Mineralization, Early Cretaceous, The Lower Reaches of Yangtze River

\* 国家自然科学基金(No. 40104003), 中国博士后科学基金以及中国科学院王宽诚博士后奖励基金资助.

第一作者简介: 汪洋, 男, 1969年生, 博士后, 岩石学和地球化学专业. E-mail: maryhiva@95777.com

**摘要** 长江中下游地区是中国重要的铜资源基地之一。该成矿带广泛发育与 Cu-Au 成矿作用密切相关的早白垩世火成岩。大多数与成矿有关的中酸性侵入岩具有类似埃达克岩的地球化学特征,即富集 Sr 而贫 HREE(如:Y 和 Yb);但它们具有负的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和相对富集的 Sr 同位素初始比值( $> 0.704$ ),因此,被称为埃达克质岩。根据岩石化学数据,研究区埃达克质侵入岩多数属于高钾钙碱性系列,部分属于钙碱性系列;而火山岩和 A 型花岗岩类由于其高钾和富铁特征而属于钾质碱性系列。岩石地球化学资料显示,与成矿作用有关的中酸性埃达克质侵入岩经历了复杂的成岩过程,至少包括在深位岩浆房( $> 35 \sim 40$  km 深度)的分离结晶和在高位岩浆房内的分离结晶或 AFC 过程两个阶段,同时不排除有下地壳直接熔融形成的埃达克质熔体参与的可能性。富钾的火山岩则是原生岩浆在深位岩浆房( $> 40 \sim 50$  km 深度)经镁铁矿物的分离结晶过程演化而来。基于长江中下游地区及其邻区的区域地质构造、早白垩世岩浆岩的岩石化学和地球化学特征和岩浆活动的时空演变特征的综合分析,推测该成矿带在早白垩世早期处于大陆边缘岩浆弧内陆一侧,岩浆活动与古太平洋板块的斜向俯冲作用有关;晚期由于俯冲板片迁移(变陡),岩浆岩具有弧后环境特征。俯冲板片上部所释放的超临界流体提高了地幔楔的氧逸度,使得 Cu、Au 等成矿元素转移到母岩浆中。而 AFC 成岩过程则有利于 Cu、Au 等元素从岩浆释放到岩浆热液中去。长江中下游地区 Cu-Au 成矿作用是中生代板块俯冲的后果之一。

**关键词** 埃达克质岩;岩石系列;大地构造背景;成矿作用;早白垩世;长江中下游地区

**中图分类号** P588.121; P618.41

## 1 引言

长江中下游地区是我国重要的铜成矿带之一,该地区与铜成矿作用密切相关的是与矿带在时空上同步发育的早白垩世侵入岩。后者也是我国东部晚中生代(燕山期)大规模岩浆活动的重要组成部分。因此,多年来众多地质工作者针对该地区的燕山期岩浆岩和 Cu-Au 等矿床以及两者之间的关系等方面开展了大量的研究工作(例如:毛建仁等,1990;常印佛等,1991;邓晋福等,1992;马昌前等,1994;周珣若和任进,1994;王德滋等,1996;唐永成等,1998;邢凤鸣和徐祥,1999)。张旗等(2001)提出长江中下游地区燕山期中酸性岩浆岩属于埃达克岩,并指出其与 Cu-Au 成矿作用有密切联系。王强等(2001,2002,2003)和许继峰等(2001)将长江中下游地区沙溪和安基山等一系列燕山期成矿岩体厘定为下地壳部分熔融形成的埃达克岩。埃达克岩的形成与俯冲洋壳的熔融、玄武质岩浆的底侵、下地壳拆沉等深部动力学过程密切相关,具有比较独特的岩石大地构造学意义(Defant and Drummond, 1990; Petford and Atherton, 1996; 吴福元等, 2002);近年来的研究表明,埃达克岩与大型-超大型热液、斑岩 Cu-Au-Mo 内生金属矿床的形成有密切联系(Thieblemont *et al.*, 1997; Sajona and Maury, 1998; Oyarzun *et al.*, 2001)。因此,长江中下游地区存在燕山期埃达克岩的认识,对深入理解该地区岩石大地构造背景和区域成矿作用机制有重要的促进意义。

对长江中下游地区早白垩世火成岩形成的大地构造背景,早期的看法是属于与古太平洋板块俯冲作用有关的大陆边缘岩浆弧(吴利仁等,1982;邓晋福等,1992);近年来则先后提出板内裂谷带(邢凤鸣和徐祥,1999;王元龙等,2001)、类盆岭省式岩石圈伸展(Li, 2000)等模式,而且认为岩浆活动与古太平洋板块俯冲作用无关。张旗等指出长江中下游

地区存在底侵作用导致加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩,意味着其形成时地壳厚度在 50 km 以上(张旗等,2001;王强等,2001,2002,2003;许继峰等,2001;Xu *et al.*, 2002)。若该推论正确,则直接否定了该地区在早白垩世为板内裂谷带或类盆岭省式伸展构造背景的认识,因为这两种大地构造背景中,地壳厚度小于 35~40 km。但是 Kay and Kay(2002)指出,被认为是下地壳部分熔融形成的埃达克岩未见得一定就是岩浆底侵导致的加厚基性下地壳部分熔融的产物。同时由于我国东部(包括长江中下游地区)中生代“埃达克岩”的钾质含量较高(张旗等,2001;吴福元等,2002),部分研究者将长江中下游地区的“埃达克岩”归属为橄榄玄粗岩系列(组合),是伸展背景下富集岩石圈地幔熔融形成幔源岩浆经 AFC 过程进一步演化的产物(唐永成等,1998;邢凤鸣和徐祥,1999)。所以,目前对长江中下游地区早白垩世包括埃达克岩在内的火成岩的成岩机制和岩石大地构造解释不是唯一的,有加以进一步探讨的必要。正确厘定长江中下游地区早白垩世火成岩形成的大地构造背景,还有助于对长江中下游地区 Cu-Au 成矿带形成的宏观地质条件的认识 and 把握,为在我国其他地域寻找类似的 Cu 矿资源提供有益的借鉴。

据前人发表的大量岩石化学和地球化学数据(邱瑞龙, 1992;周珣若和任进, 1994;唐永成等,1998;王强等,2001, 2002,2003;许继峰等,2001;Xu *et al.*, 2002),长江中下游的铜陵、宁芜、宁镇、怀宁、庐江、滁县、鄂东南和封山洞-瑞昌-九江(封瑞九)地区与 Cu-Au 矿相关的早白垩世中酸性侵入岩具有埃达克岩最基本的元素地球化学特征( $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ , 高 Sr 含量( $> 400 \mu\text{g/g}$ ),高 Sr/Y( $\geq 40$ )和 La/Yb( $\geq 20$ )比值,强烈亏损 Y( $\leq 18 \mu\text{g/g}$ )和 Yb( $\leq 1.9 \mu\text{g/g}$ )。另一方面,这些岩石与典型的埃达克岩相比,具有负的( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ )值和相对富集的 Sr 同位素初始比值( $> 0.704$ ),按照经典的定义不宜直接称之为埃达克岩(参见吴福元等,2002)。因此,在下面的论述中我们将这些岩石称为埃达克质岩(adakite-like rocks)。

## 2 地质概况和资料来源

长江中下游地区出露众多与燕山期埃达克质侵入岩密切相关的 Cu-Au 矿床(图 1),例如:(1)鄂东南地区与铁山闪长岩相关的 Cu-Fe 矿,与铜绿山(阳新)石英闪长岩相关的 Cu 矿,(2)封瑞九地区与武山花岗闪长岩相关的 Cu 矿,与封山洞花岗闪长斑岩相关的 Cu-Mo 矿,(3)庐江-怀宁地区与沙溪石英闪长岩相关的 Cu-Au 矿,与月山闪长岩相关的 Cu-Fe 矿,(4)铜陵地区与铜官山、狮子山、冬瓜山闪长岩、石英闪长岩相关的大型 Cu 矿,(5)宁镇地区与安基山花岗闪长岩相关的 Cu-Mo 矿等。研究表明,这些矿床与相关侵入岩的形成时代基本一致(毛建仁等,1990;陈江峰等,1993;马昌前等,

1994; 周珣若和任进, 1994; 毛景文等, 2003), 为侏罗纪末—早白垩世(140 ~ 100 Ma)。总体上, 长江中下游地区此次岩浆活动和成矿作用可以分为两期。第一期的时代在 140 ~ 133 Ma 左右, 包括铜陵地区的侵入岩(陈江峰等, 1993; 唐永成等, 1998), 庐江—怀宁地区的月山闪长岩(周珣若和任进, 1994; 吴才来等, 1996; 毛景文等, 2003), 庐枞盆地的龙门院组和砖桥组火山岩(刘洪等, 2002), 鄂东南和封瑞九地区的侵入岩(周珣若和任进, 1994; 吴才来等, 1996)以及相应的内生金属矿床(毛景文等, 2003)。第二期的时代为 132 ~ 110 Ma 左右, 包括宁镇—宁芜地区的侵入岩和火山岩(陈江峰等, 1993; 唐永成等, 1998; 张旗等, 2003), 庐枞盆地的双庙组和浮山组火山岩(刘洪等, 2002)以及相应矿床(毛景文等, 2003)。

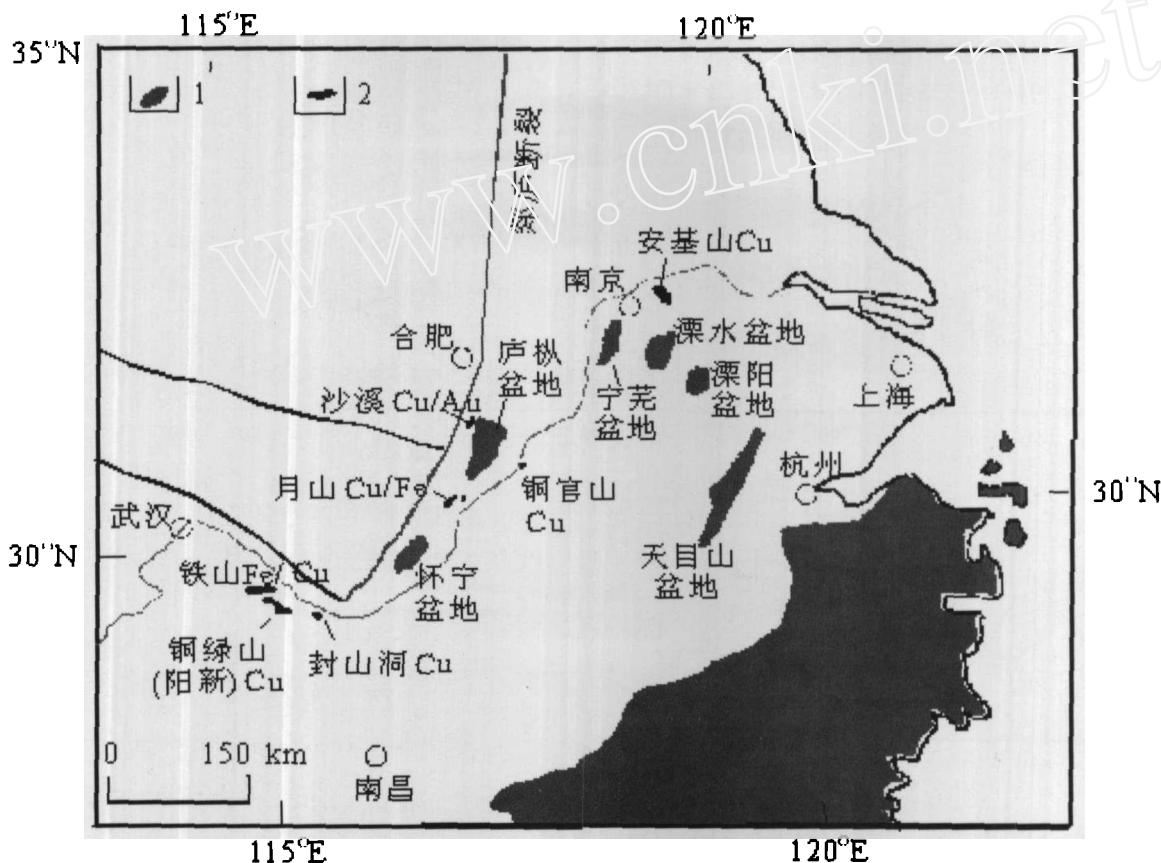


图1 长江中下游成矿带及邻区早白垩世火成岩分布简图

1. 火山岩盆地; 2. 主要矿化岩体

Fig. 1 The sketch map for the Early Cretaceous igneous rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and its surrounding regions

考虑到侏罗/白垩纪的界限在 140 ~ 135 Ma, 在本文中对长江中下游发育的这一大套晚燕山期岩浆岩统称之为早白垩世岩浆岩, 并将 132 Ma 之前的称之为早白垩世早期, 之后的称之为早白垩世晚期。根据长江中下游地区晚中生代的

岩浆活动的时空特征(毛建仁等,1990;周珣若和任进,1994;唐永成等,1998;邢凤鸣和徐祥,1999),将研究区的火成岩资料进行分区处理,即:(1)铜陵地区基性侵入岩和埃达克质侵入岩( $>130\text{ Ma}$ ), (2)宁芜-宁镇地区的基性侵入岩和

埃达克质侵入岩( $<130$  Ma), (3) 宁芜地区火山岩( $<132$  Ma), (4) 怀宁-庐江-滁县地区早期侵入岩( $>130$  Ma), (5) 怀宁-庐江-滁县地区晚期基性侵入岩和埃达克质侵入岩( $<130$  Ma), (6) 庐枞龙门院组-砖桥组火山岩, (7) 庐枞双庙组-浮山组火山岩, (8) 鄂东南-封瑞九地区基性侵入岩和埃达克质侵入岩。同时, 将安徽沿江岩浆岩带以南地区(唐永成等(1998), 邢凤鸣和徐祥(1999)所称南外带)早白垩世侵入岩及下扬子地区早白垩世 A 型花岗岩类(即安徽沿江地区 A 型花岗岩类和苏州岩体)一并列出, 以资对比。

本文所用火成岩的分析资料来自下列文献: (1) 铜陵地区侵入岩据唐永成等(1998)和王强等(2002, 2003); (2) 宁芜-宁镇地区(以下统称宁芜地区)的侵入岩据宁仁祖和陈根生(1989)、唐永成等(1998)、许继峰等(2001)和 Xu 等(2002); (3) 宁芜地区火山岩据陈上达等(1992)、汤德平和陈凤贤(1992)和王元龙等(2001); (4) 怀宁-庐江-滁县地区侵入岩据邱瑞龙(1992)、周珣若和任进(1994)、唐永成等(1998)和王强等(2001, 2002); (5) 庐枞地区火山岩据唐永

成等(1998)、刘洪等(2002)和王强等(2002); (6) 鄂东南-封瑞九地区侵入岩据周珣若和任进(1994)、王强等(2002); (7) 安徽沿江岩浆岩带以南地区侵入岩据唐永成等(1998); (8) 下扬子地区早白垩世 A 型花岗岩类据周珣若和任进(1994)、唐永成等(1998)和 Li(2000)。对文献中给出的由多个实测数据平均的成分数据未加采用, 对文献中明确指出遭受过围岩同化混染的岩体的分析数据也一概不予采用。

### 3 岩石系列(组合)

对火成岩研究而言, 确定其所属的岩石系列(组合)以及其化学成分特征, 对反映其成分演变趋势, 判别其形成的岩石大地构造背景具有重要的意义(邓晋福和肖庆辉, 2002)。因此, 我们根据岩石化学分析结果, 按照传统的岩浆岩系列(组合)划分方案和程序(邓晋福和肖庆辉, 2002)进行判别(图 2~4)。

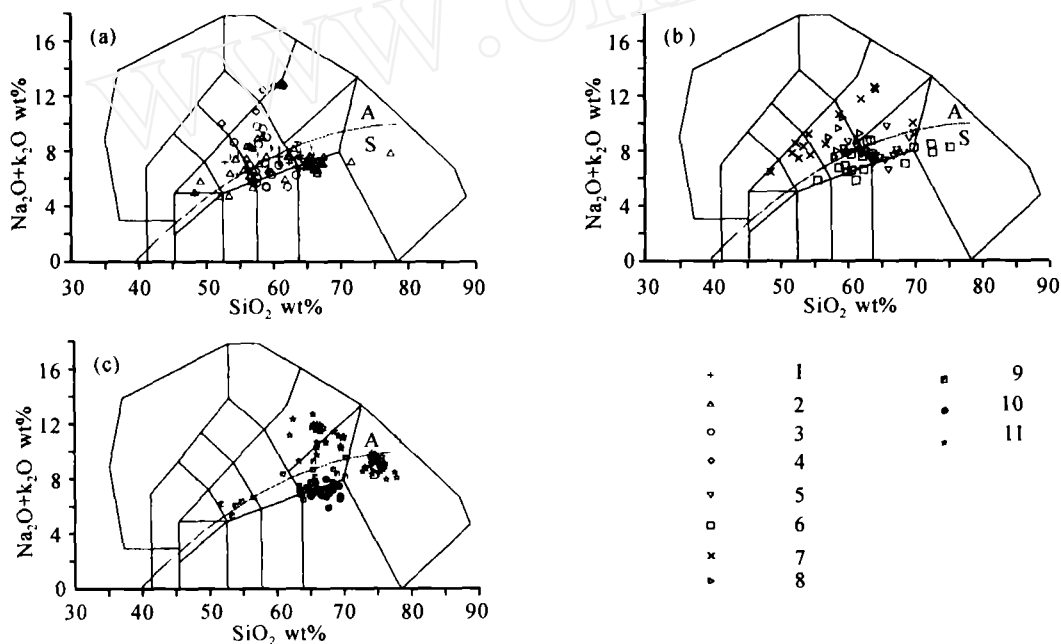


图 2 长江中下游地区早白垩世火成岩 TAS 图解

曲线为碱性系列(A)和亚碱性系列(S)分界线(据 Irvine 和 Baragar, 1971)

1. 铜陵; 2. 宁芜侵入岩; 3. 宁芜龙王山组-大王山组-姑山组火山岩; 4. 宁芜娘娘庙组火山岩; 5. 怀宁-庐江-滁县地区早白垩世早期侵入岩; 6. 怀宁-庐江-滁县地区早白垩世晚期侵入岩; 7. 庐枞早白垩世晚期火山岩(双庙组-浮山组); 8. 庐枞早白垩世早期火山岩(龙门院组-砖桥组); 9. 鄂东南-封瑞九地区早白垩世侵入岩; 10. 安徽沿江岩浆岩带以南地区早白垩世侵入岩; 11. 下扬子地区早白垩世 A 型花岗岩类(即: 安徽沿江地区 A 型花岗岩类和苏州岩体)

Fig. 2 The TAS diagram of early Cretaceous igneous rocks in the Lower Reaches of Yangtze River

铜陵地区侵入岩成分点在 TAS 图解(图 2a)中分布在 Irvine 和 Baragar(1971)划分的碱性和亚碱性系列的界线附近, 据 Miyashiro(1974)的 TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解(图 3a), 这些

成分点具有钙碱性系列演化趋势, 其演化线的斜率略小于钙碱性系列(CA)和拉斑系列(TH)分界线的斜率, 即岩浆向贫铁方向演化; 在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图(图 4a)中, 铜陵侵入岩主要分

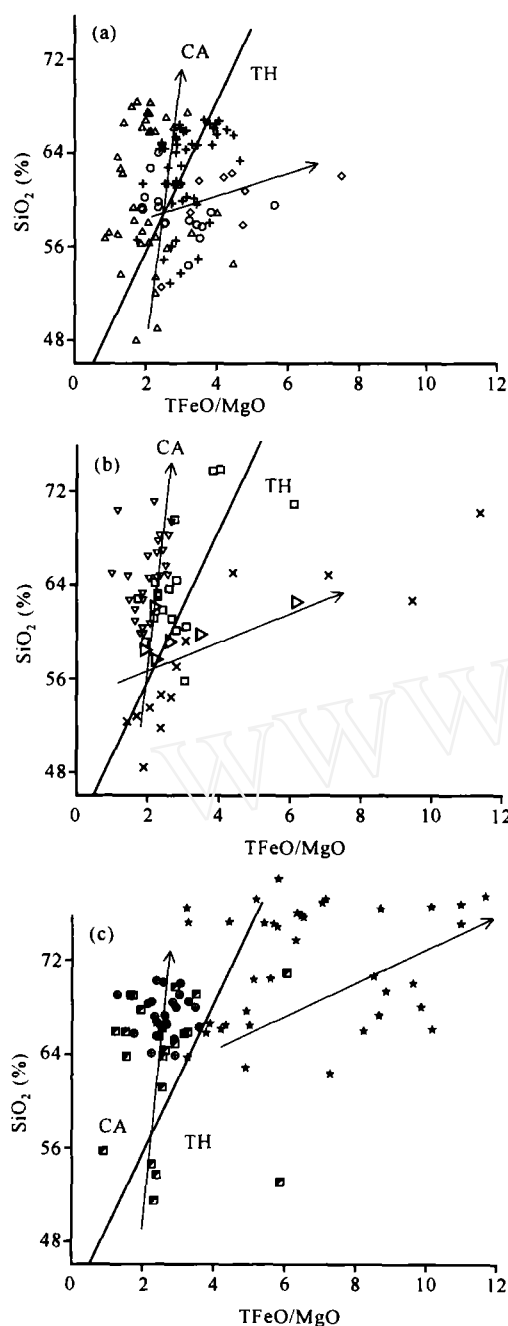


图3 长江中下游地区早白垩世火成岩 TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解

CA: 钙碱性系列; TH: 拉斑系列. 箭头线表示演化趋势. 岩石成分点符号含义同图2

Fig.3 The TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> diagram of early Cretaceous igneous rocks in the Lower Reaches of Yangtze River

布在高钾钙碱性(HKCA)区域,少数分布在橄榄安粗岩系列(SH)区域,其中的基性岩分布在高钾钙碱性和橄榄安粗岩系列的交界处。从整体看,铜陵侵入岩属于高钾钙碱性系列。

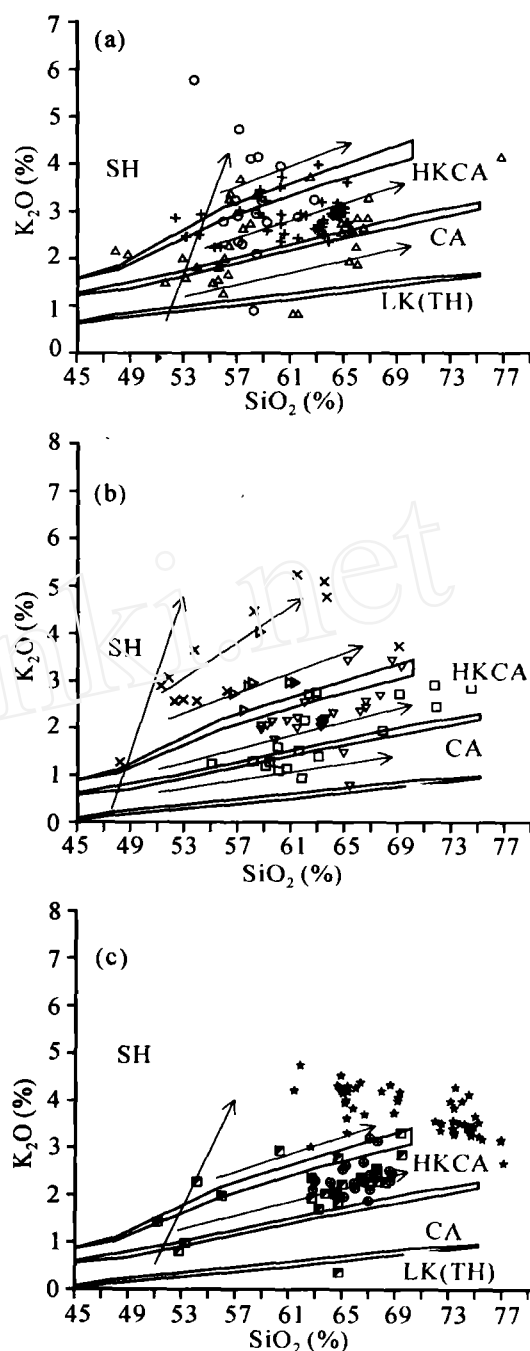


图4 长江中下游地区早白垩世火成岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解

CA: 钙碱性系列; HKCA: 高钾钙碱性系列; LK(TH): 低钾(拉斑)系列; SH: 钾玄岩系列. 箭头线表示演化趋势. 岩石成分点符号含义同图2

Fig.4 The SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram of early Cretaceous igneous rocks in the Lower Reaches of Yangtze River

宁芜地区的侵入岩成分点在 TAS 图解(图2a)中也分布在碱性和亚碱性系列界线两侧附近; TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解(图3a)中,这些成分点具钙碱性系列演化趋势;在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图(图4a)中,宁芜侵入岩主要分布在钙碱性(CA)和高钾钙

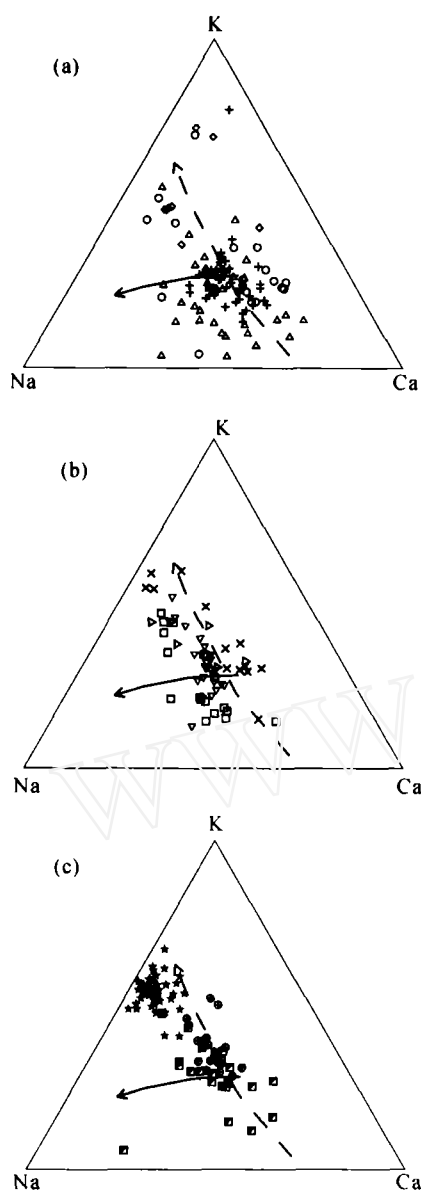


图5 长江中下游地区早白垩世火成岩 Na-K-Ca 图解  
虚线示钙碱性演化趋势；实线示 TTG 演化趋势；岩石成分点符号含义同图 2

Fig. 5 The Na-K-Ca diagram of early Cretaceous igneous rocks in the Lower Reaches of Yangtze River

碱性区域,少数分布在橄榄安粗岩系列(SH)区域。因此,宁芜侵入岩主体属于钙碱性和高钾钙碱性系列。

宁芜地区龙王山组、大王山组和姑山组火山岩的成分点在 TAS 图解(图 2a)中分布于碱性和亚碱性系列界线两侧; TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解(图 3a)中,这些成分点具有较明显的拉斑系列演化趋势,即其演化线的斜率大于钙碱性系列和拉斑系列分界线的斜率,向富铁方向演化;在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图(图

4a)中,宁芜地区龙王山组、大王山组和姑山组火山岩主要分布在高钾钙碱性区域,部分分布在橄榄安粗岩系列(SH)区域。由于其明显的富铁特征,这些火山岩不应当属于 Morrison(1980)定义的标准橄榄安粗岩系列(组合)(shoshonite series/association),而是一套向钾质碱性系列过渡的岩石组合。

在 TAS 图解中,宁芜地区娘娘山组火山岩分布于碱性系列界线一侧(图 2a),显著富钾(图 4a 中未表示),具有明显的富铁演化趋势(图 3a);属于钾质碱性系列。

怀宁-庐江-滁县地区早白垩世早期侵入岩(月山、滁县岩体等),在 TAS 图解中分布于碱性和亚碱性系列界线附近,但明显偏向亚碱性一侧(图 2b);在 TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解(图 3b)中具钙碱性系列演化趋势;在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图(图 4b)中成分点主要在高钾钙碱性区域,少部分在钙碱性和橄榄安粗岩系列(SH)区域。这些侵入岩属于高钾钙碱性系列。

怀宁-庐江-滁县地区早白垩世晚期侵入岩(沙溪、洪镇岩体等),在 TAS 图解中主要分布在亚碱性一侧(图 2b);在 TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解(图 3b)中仍表现为钙碱性系列演化趋势;在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图(图 4b)中成分点主要在钙碱性和高钾钙碱性区域。这些侵入岩属于钙碱性和高钾钙碱性系列。

庐枞盆地火山岩早期旋回(龙门院组-砖桥组)火山岩,在 TAS 图解(图 2b)中分布于碱性系列一侧;TFeO/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解(图 3b)中,成分点具有明显的富铁演化趋势;在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图(图 4b)中,龙门院组-砖桥组火山岩主要分布在橄榄安粗岩系列(SH)区域。由于其较明显的富铁特征,这些火山岩亦不属于标准的橄榄安粗岩系列(组合),而是钾质碱性系列岩石组合。庐枞盆地火山岩晚期旋回(双庙组-浮山组)火山岩,其钾质碱性系列岩石组合特征表现得更为鲜明(图 2b,3b,4b)。

鄂东南和封瑞九地区的侵入岩,其岩石化学特征与铜陵侵入岩、怀宁-庐江-滁县地区早白垩世早期侵入岩类似,主体属于高钾钙碱性系列(图 2c,3c,4c)。安徽沿江岩浆岩带以南地区侵入岩亦属于高钾钙碱性系列(图 2c,3c,4c)。下扬子地区早白垩世 A 型花岗岩类主体属于钾质碱性系列和高钾钙碱性系列组合(图 2c,3c,4c)。

综合上述,长江中下游地区早白垩世火山岩属于钾质碱性系列和高钾钙碱性系列,在岩石化学特征上表现出从早到晚,碱度(主要是钾含量)明显增高的趋势,而且火山岩的碱度和钾含量普遍高于同期的侵入岩。研究区早白垩世侵入岩(包括埃达克质岩)基本属于高钾钙碱性系列,部分属钙碱性系列;在 Na-K-Ca 图解(图 5)上,铜陵、宁芜、怀宁-庐江-滁县、鄂东南及封瑞九地区中酸性侵入岩一部分表现了向富钠端元的演化趋势(TTG 趋势),另一部分显示相对富钾的演化趋势。这与吴福元等(2002)总结的我国东部中生代埃达克质岩主体属于高钾钙碱性,少部分属于钙碱性的结论相一致。

#### 4 成岩过程探讨

对火成岩岩石大地构造研究而言, 确定其岩石组合的成岩过程对正确识别其形成的大地构造和深部动力学背景具有启示和帮助作用。

前人多强调来自富集地幔的高钾碱性玄武岩或橄榄玄粗岩作为对长江中下游地区燕山期火成岩成岩演化的母岩浆 (parental magma), 但是在长江中下游地区并未发现有燕山期的幔源原生岩浆 (primary magma)。根据近年发表的具有较高分析精度的文献 (汤德平和陈凤贤, 1992; 王元龙等, 2001; 王强等, 2001, 2002, 2003; 许继峰等, 2001; 刘洪等, 2002; Xu *et al.*, 2002), 研究区基性岩 (包括侵入岩和火山岩) 的  $Mg^{\#}$  ( $< 0.65$ , 绝大多数  $< 0.6$ ) 和  $Ni$  ( $< 100 \mu g/g$ ) 含量均远低于原生岩浆 ( $Mg^{\#} > 0.65$ ,  $Ni > 300 \mu g/g$ )。岩石学研究表明, 铜陵地区的一些基性岩 (碱长辉长岩和碱

长辉长闪长岩) 具有富碱高钾、基质富钙的特点, 其主要镁铁矿物为 (富钙) 透辉石 - 次透辉石, 与矽卡岩密切共生, 其形成与岩浆遭受钙质围岩的强烈同化混染有关 (唐永成等, 1998)。在宁镇地区, 宁仁祖和陈根生 (1989) 的研究亦表明, 当地的基性侵入岩至少在接触带附近已遭受围岩的强烈混染。研究区基性岩的富碱高钾特征一方面可能是原生玄武质岩浆演化后的结果 (Meen, 1990), 另一方面可能与围岩的强烈同化混染有关, 并不能直接说明原始岩浆就是高钾碱性玄武岩或橄榄玄粗质岩浆。

在  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - 1/Sr$  和  $\epsilon_{Nd}(t) - 1/Nd$  图解 (图 6a, b) 中, 铜陵和宁芜地区基性侵入岩成分点的排列显示同化混染的演化趋势。所以, 尚缺乏有力的证据可表明长江中下游地区早白垩世基性侵入岩的 Sr、Nd 同位素组成能够代表其幔源原生岩浆的同位素特征, 因而也不能证明这些基性侵入岩确实源自富集 Sr、Nd 同位素的岩石圈地幔。

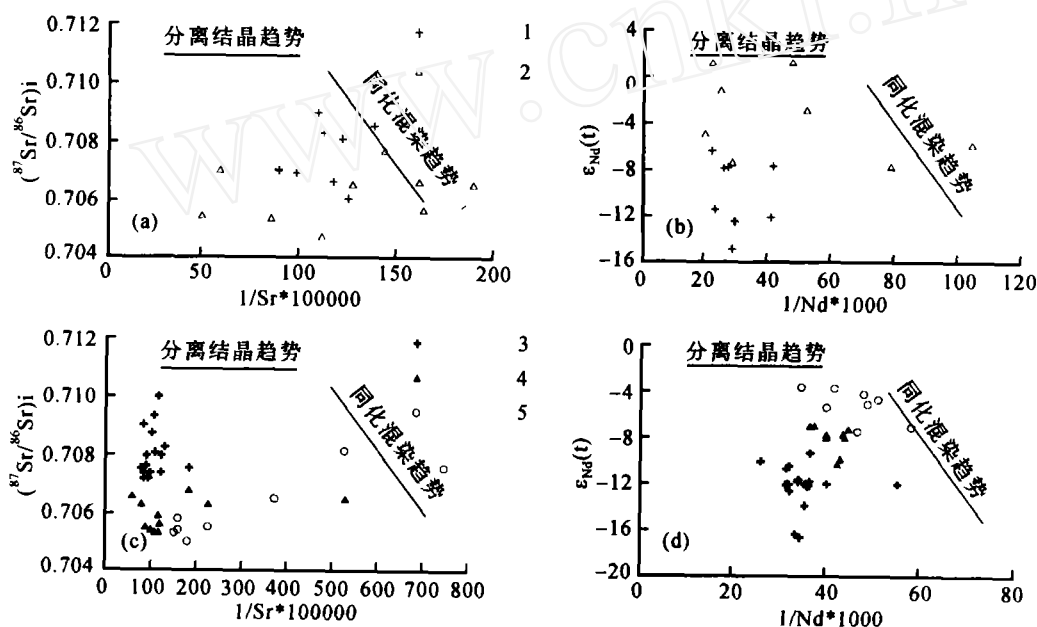


图 6 铜陵和宁芜地区早白垩世火成岩  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - 1/Sr$  和  $\epsilon_{Nd}(t) - 1/Nd$  图解

水平线: 分离结晶 (fractional crystallization) 演化趋势; 斜线: 同化混染 (assimilation) 演化趋势。

1. 铜陵基性侵入岩; 2. 宁芜基性侵入岩; 3. 铜陵中酸性侵入岩; 4. 宁芜中酸性侵入岩; 5. 宁芜龙王山组-大王山组-姑山组火山岩

Fig. 6 The  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - 1/Sr$  and  $\epsilon_{Nd}(t) - 1/Nd$  diagrams of early Cretaceous igneous rocks in Tongling and Ningwu area

综上所述, 我们认为没有必要一定以源自富集岩石圈地幔的高钾碱性玄武岩或橄榄玄粗质岩作为长江中下游地区早白垩世所有火成岩成岩演化的母岩浆; 虽然对庐枞和宁芜盆地晚期高度富钾的火山岩而言并不完全排除这种可能性。

根据岩石化学和地球化学数据的质量和数量, 选择铜陵、宁芜和怀宁-庐江-滁县地区的基性侵入岩和埃达克质侵入岩以及宁芜和庐枞盆地的火山岩, 探讨长江中下游地区

火成岩的成岩过程。

我们注意到在  $SiO_2 - K_2O$  图中, 铜陵和宁芜地区侵入岩偏基性的成分点其  $K_2O$  含量有随  $SiO_2$  增加而急剧增高的趋势 (图 4a 中斜率陡的箭头线, 宁芜的两个  $SiO_2$  小于 50% 的成分点怀疑其遭受围岩的混染导致  $SiO_2$  含量偏低)。Meen (1990) 的实验岩石学研究表明, 玄武质岩浆在高压下 ( $> 1 GPa$ ) 结晶时, 晶出的辉石量多, 橄榄石相对少, 最终导致熔体中钾的高度富集, 而  $SiO_2$  并未明显增加。在其它氧化

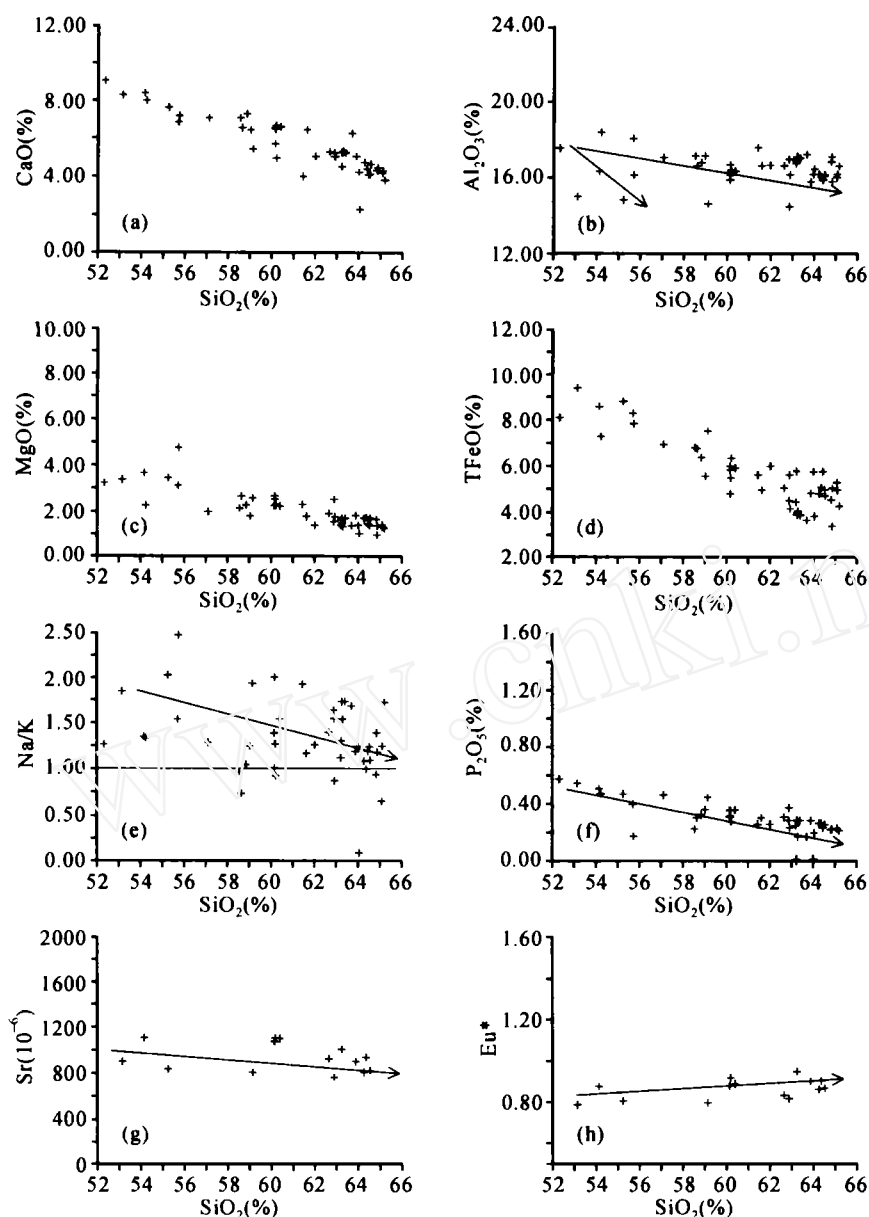


图7 铜陵地区早白垩世侵入岩 Hacker 图解

箭头线表示演化趋势。岩石成分点符号含义同图2

Fig. 7 The Hacker diagram of early Cretaceous plutonic rocks in Tongling area

物对  $\text{SiO}_2$  的 Hacker 图解中(图7、8),随岩浆成分的演进,铜陵和宁芜地区基性侵入岩的  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TFeO}$  降低,表明有辉石等镁铁矿物的分离。因此,铜陵和宁芜地区基性侵入岩是幔源母岩浆在高压下分离结晶的产物。

铜陵地区中酸性埃达克质侵入岩,其  $\text{K}_2\text{O}$  含量随  $\text{SiO}_2$  增加的趋势明显变缓,沿高钾钙碱性(HKCA)的演化趋势方向变化(图4a中右边三个缓斜率箭头线)。Hacker 图解同时显示,铜陵地区侵入岩  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量和  $\text{Na/K}$  比值随  $\text{SiO}_2$  含量增加呈降低趋势,表明岩浆演化过程中斜长石的分离(图7)。其  $\text{Sr}$  含量随  $\text{SiO}_2$  升高而略有降低,但仍属于高  $\text{Sr}$  岩浆

( $> 600 \mu\text{g/g}$ )。在  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - 1/\text{Sr}$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - 1/\text{Nd}$  图解中,铜陵地区中酸性埃达克质侵入岩成份点的排列形式明确显示同化混染作用的存在(图6c, d)。结合 Hacker 图解,推断这些侵入岩成岩过程中,其母岩浆经历了与地壳物质混合的 AFC 演化阶段,而后者有可能是玄武质成份下地壳熔融形成的埃达克质熔体。

宁芜地区中酸性埃达克质侵入岩,其  $\text{K}_2\text{O}$  含量亦随  $\text{SiO}_2$  增加的趋势明显变缓,沿钙碱性(CA)或高钾钙碱性(HKCA)的演化趋势方向变化(图4a)。宁芜地区侵入岩  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sr}$  含量和  $\text{Na/K}$  比值随  $\text{SiO}_2$  增加而降低,但变化的轨迹比较复杂



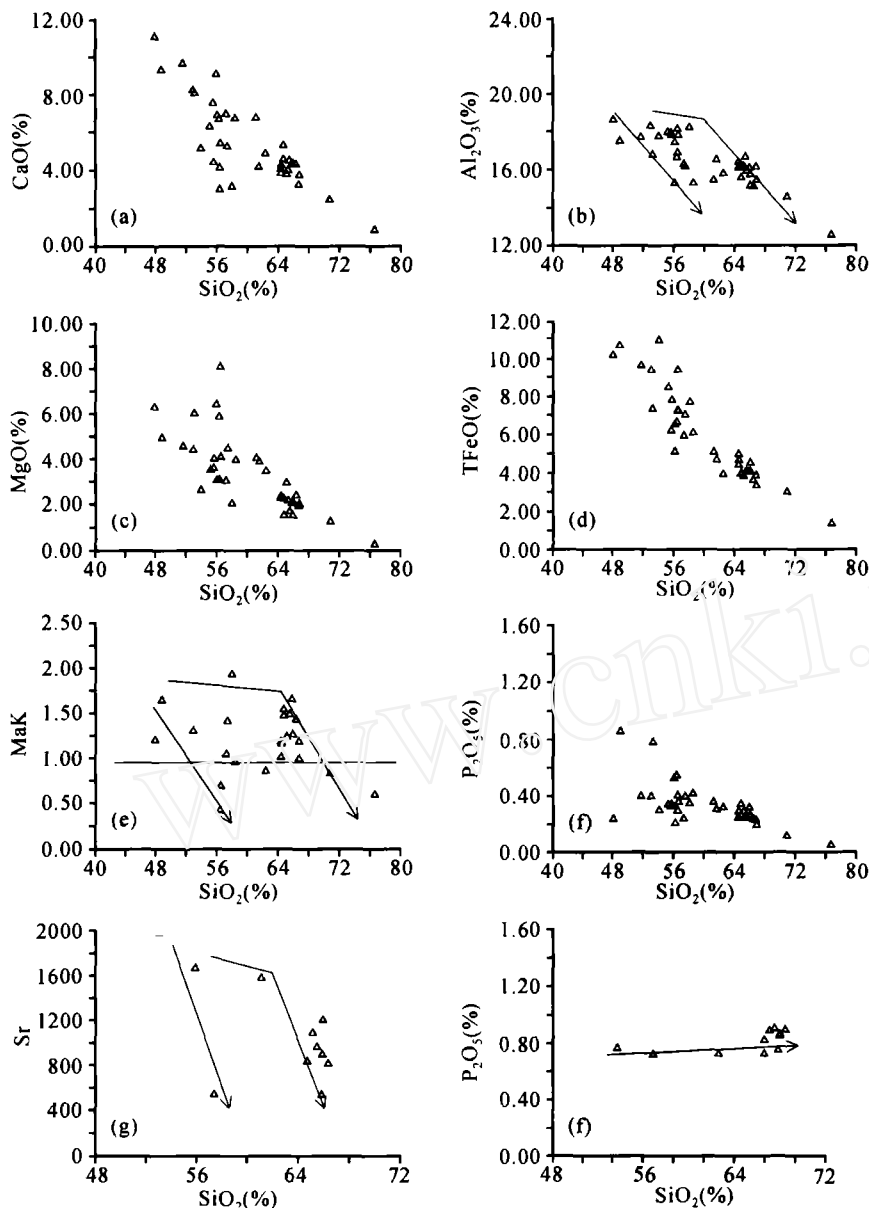


图8 宁芜地区早白垩世侵入岩 Hacker 图解

箭头线表示演化趋势；岩石成分点符号含义同图2

Fig. 8 The Hacker diagram of early Cretaceous plutonic rocks in Ningwu area

(图8)。从图8g可以看出,部分Sr随 $\text{SiO}_2$ 升高而急剧降低(但Sr含量绝对值仍然很高);另一部分则具有先缓慢下降而后急剧降低的演化轨迹(Sr含量绝对值也很高)。宁芜中酸性侵入岩成份点在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - 1/\text{Sr}$ 图解中部分具有同化混染演化趋势,部分显示结晶分离演化趋势(图6c),在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - 1/\text{Nd}$ 图解中显示同化混染演化趋势(图6d)。据此推测宁芜地区埃达克质侵入岩成岩过程中,其母岩浆部分与地壳物质较少混合,主要经历斜长石分离结晶(FC)演化,另一部分则与地壳物质发生较多的混合,经历了AFC演化。

Hacker图解还显示 $\text{P}_2\text{O}_5$ 随 $\text{SiO}_2$ 含量增高而降低,表明岩浆演化过程中磷灰石的分离(图7,8)。由于磷灰石一般

具有Eu负异常(Watson and Capobianco, 1981; Hoskin *et al.*, 2000),磷灰石的分离可抵消因斜长石等矿物相分离而产生的Eu亏损。因此铜陵和宁芜地区侵入岩Eu\*值并未随 $\text{SiO}_2$ 升高而趋于亏损(图7,8)。

怀宁-庐江-滁县地区的埃达克质侵入岩成分点在表现出显著的结晶分离演化趋势(图9)。随岩浆成分的演进,其CaO、MgO、TFeO和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量明显降低,表明有镁铁矿物和斜长石的分离。同时,岩浆成分向富钾质方向演化,Na/K比值随 $\text{SiO}_2$ 的增加而降低。虽然该地区埃达克质岩 $\text{P}_2\text{O}_5$ 亦随 $\text{SiO}_2$ 含量增高而降低,表明有磷灰石的分离结晶,但由于斜长石等矿物相的大量分离,这些侵入岩的Sr含量随岩浆

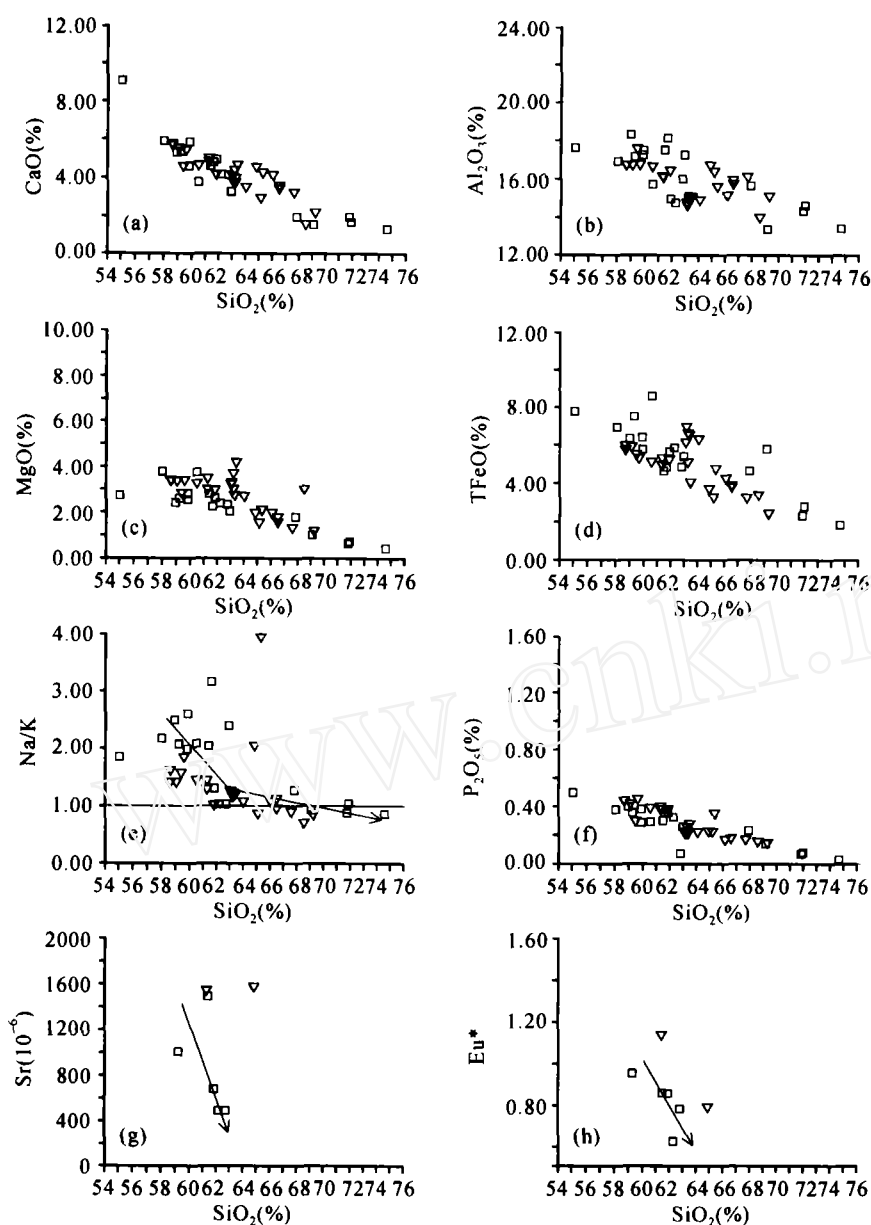


图9 怀宁-庐江-滁县地区早白垩世侵入岩 Hacker 图解

箭头线表示演化趋势; 岩石成分点符号含义同图2

Fig.9 The Hacker diagram of early Cretaceous plutonic rocks in Huaining-Lujiang-Chuxian area

成分的演进具有明显降低的趋势,  $Eu^*$  值也趋于亏损(图9)。

宁芜地区早白垩世大王山组-龙王山组-姑山组火山岩成分点在 Hacker 图解上的演化趋势(图10中的圆圈符号)与宁芜地区侵入岩类似(图8)。随岩浆成分的演进, 其  $CaO$ 、 $MgO$ 、 $TFeO$ 、 $Al_2O_3$ 、 $P_2O_5$ 、 $Sr$  含量和  $Na/K$  比值均呈现降低趋势, 但变化的轨迹比较复杂。随  $SiO_2$  增加, 部分成分点呈急剧降低的演化趋势, 另一部分则具有先缓慢下降而后急剧降低的演化轨迹。在  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - 1/Sr$  和  $\epsilon_{Nd}(t) - 1/Nd$  图解中, 这些火山岩成分点的排列形式均反映同化混染作用的存在(图6c, d)。由于存在磷灰石大量分离结晶的演化阶段,

所以大王山组-龙王山组-姑山组火山岩部分成分点表现出  $Eu^*$  值随岩浆成分的演进而增高的趋势。

宁芜地区早白垩世娘娘山组火山岩成分点在 Hacker 图解上体现分离结晶演化趋势(图10中的菱形符号)。随  $SiO_2$  的增加, 其  $CaO$ 、 $MgO$  和  $TFeO$  含量明显降低,  $P_2O_5$  含量也降低。但其  $Al_2O_3$  含量不具随  $SiO_2$  增加而降低的整体趋势。因此, 镁铁矿物的分离结晶作用可能是该组火山岩的主要成岩演化方式; 同时, 其岩浆房应位于高于斜长石可稳定存在的压力条件 ( $> 1.5$  GPa) 的深度

庐枞地区早白垩世火山岩成分点在 Hacker 图解上的演

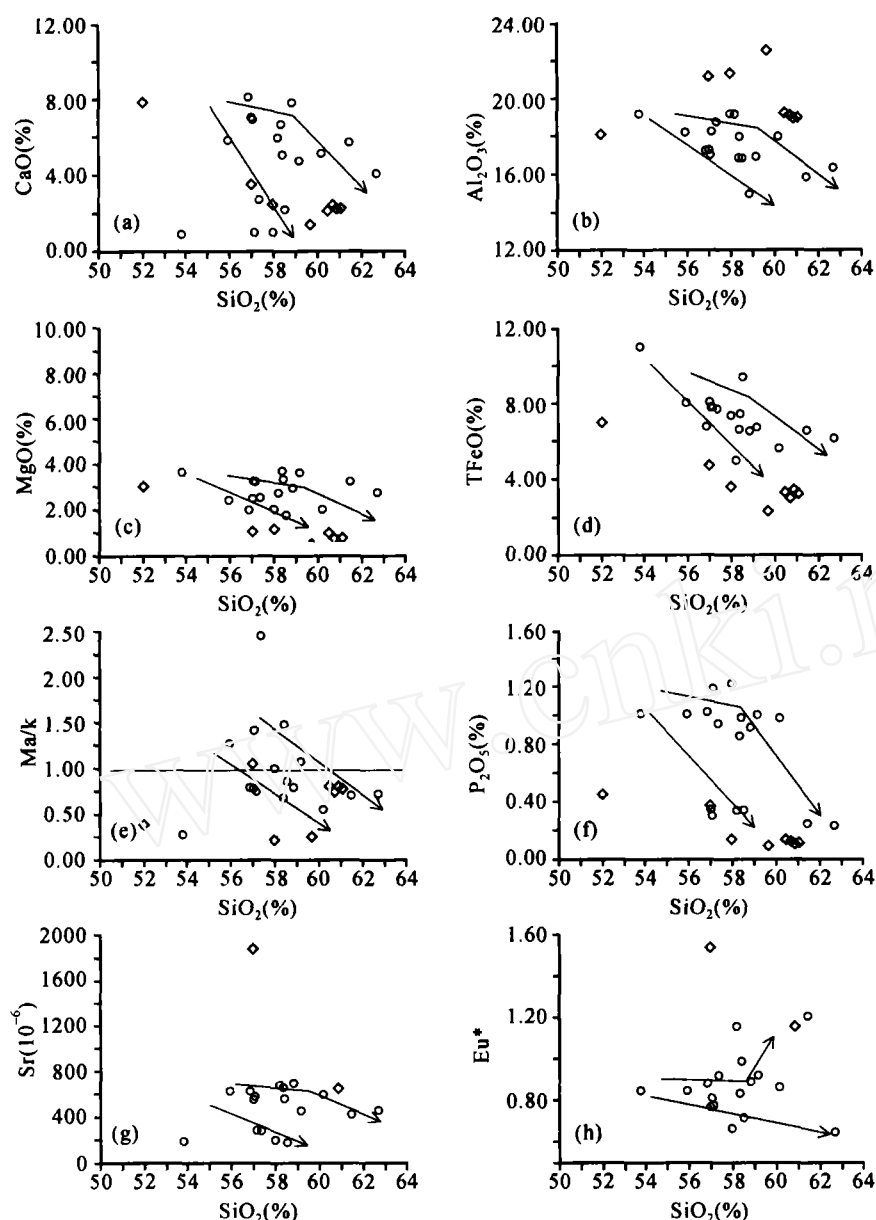


图 10 宁芜地区早白垩世火山岩 Hacker 图解

箭头线表示演化趋势. 岩石成分点符号含义同图 2

Fig. 10 The Hacker diagram of early Cretaceous volcanic rocks in Ningwu area

化趋势(图 11)与宁芜地区娘娘山组火山岩类似。随岩浆成分的演进,其  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TFeO}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量明显降低,但  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不具随  $\text{SiO}_2$  增加而降低的趋势。注意到  $\text{SiO}_2$  -  $\text{K}_2\text{O}$  图中庐枞火山岩基性端元成分点  $\text{K}_2\text{O}$  含量随  $\text{SiO}_2$  增加而急剧增高(图 4b 中斜率陡的箭头线),而偏中、酸性的成分点  $\text{K}_2\text{O}$  含量随  $\text{SiO}_2$  增加的趋势明显变缓(图 4b)。据此推断该地区火山岩经历了高压条件 ( $>1.5 \text{ GPa}$ ) 下的镁铁矿物分离结晶作用(Meen, 1990)。

归纳起来,长江中下游地区早白垩世埃达克质侵入岩的形成可能经历了两个成岩阶段:(1)幔源原生岩浆在地壳

深部(至少大于  $35 \sim 40 \text{ km}$ )的岩浆房内经过分离结晶机制演化,成为高  $\text{K}_2\text{O}$  含量的基性岩浆;(2)基性岩浆在相对高位的岩浆房内经过分离结晶过程或 AFC 过程形成中酸性的埃达克质侵入岩。同时不排除 AFC 过程中与基性岩浆混合的地壳物质为玄武质下地壳直接熔融的埃达克质成分熔体的可能性。成岩过程中的分离结晶过程或 AFC 过程导致研究区埃达克质侵入岩相对富钾。埃达克质侵入岩的高 Sr 特征与幔源基性岩浆的高 Sr 含量密切相关。

长江中下游地区属于高钾钙碱性系列的早白垩世火山岩(如:宁芜地区大王山组-龙王山组-姑山组)的成岩机制

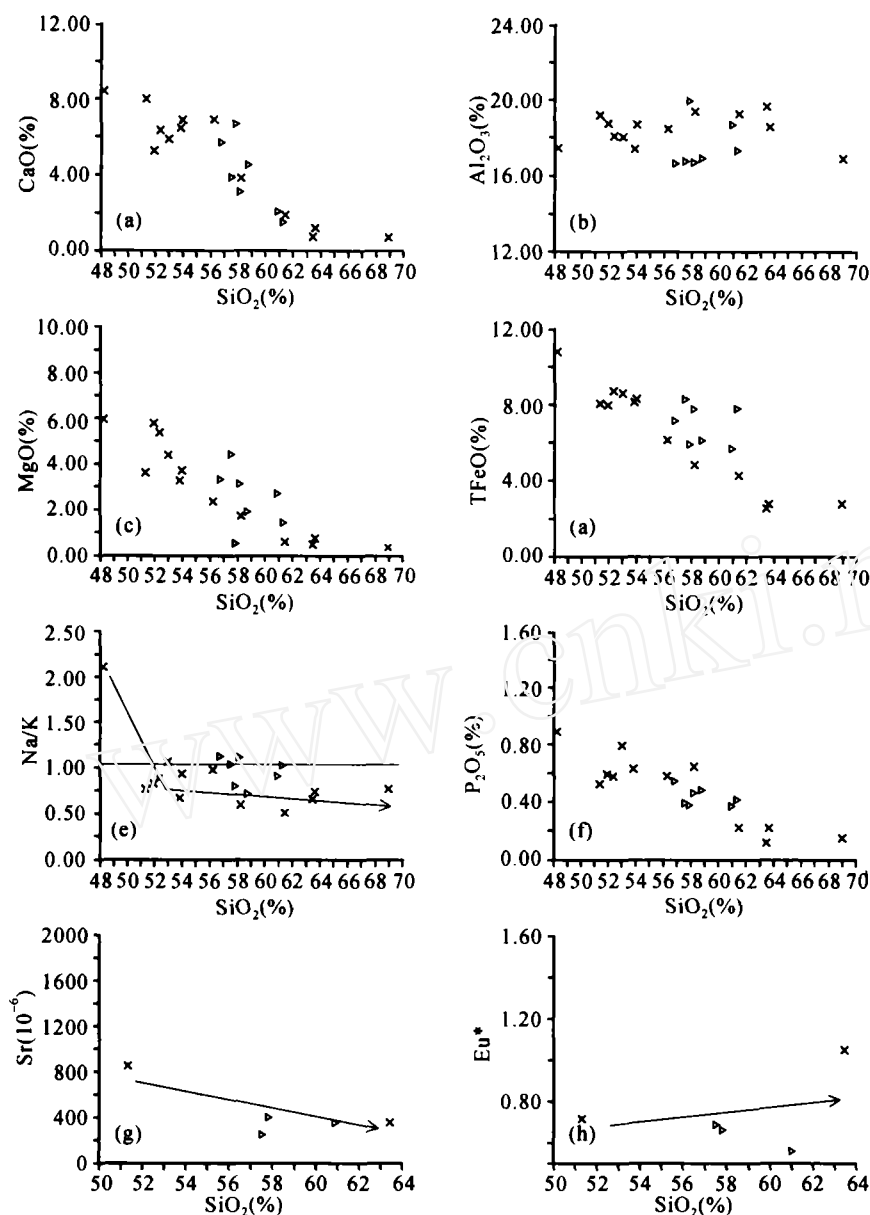


图 11 庐枞地区早白垩世火山岩 Hacker 图解

箭头线表示演化趋势; 岩石成分点符号含义同图 2

Fig. 11 The Hacker diagram of early Cretaceous volcanic rocks in Lujiang-Zongyang area

类似于埃达克质侵入岩。而高度富钾的钾质碱性系列的火山岩(如:宁芜地区娘娘山组和庐枞地区火山岩)则是原生岩浆在深部岩浆房(大于 40~50 km)经过分离结晶机制演化的产物。

## 5 大地构造背景

区域地质研究表明,白垩纪长江中下游地区逆冲推覆构造发育。在安徽宣城九连山可见由志留系-三叠系组成的推覆体逆掩于早白垩世中分村组(时代相当于龙王山组)火山

岩之上,构造标志指示由南东向北西推覆,其北东延伸即为江苏茅山推覆构造(安徽省地矿局,1987;唐永成等,1998)。类似情况在江苏江阴、泰州、宁镇山脉、浙江长兴、安徽芜湖火龙岗等地均有出现(安徽省地矿局,1987;邓晋福等,1992)。陶奎元(1988)指出,浙闽地区的第三旋回火山岩不整合于第一、二旋回火山岩之上,暗示了挤压造山作用的存在。

长江中下游地区早白垩世火成岩的成分特征也指示其形成与造山作用有关。根据 Maniar 和 Piccoli(1989)的花岗岩类构造分类图解,研究区中酸性侵入岩( $\text{SiO}_2 > 60\%$ ),除

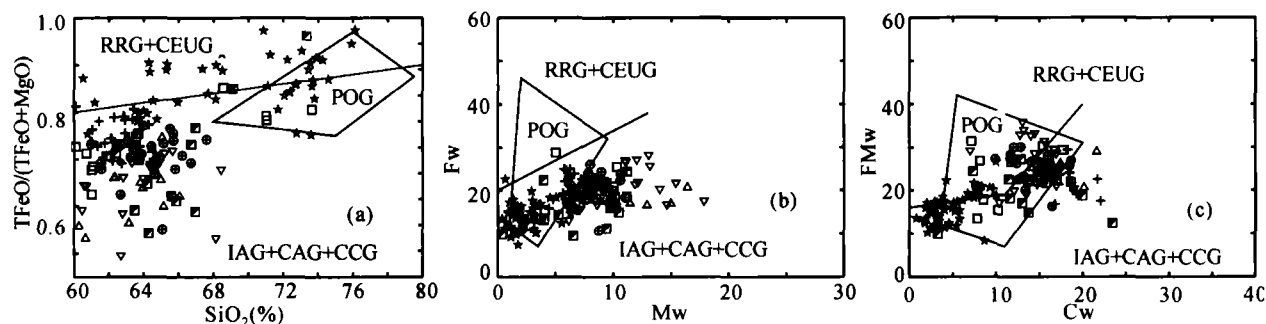


图 12 长江中下游地区火成岩  $\text{SiO}_2$ - $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$  (a)、 $\text{Mw}$ - $\text{Fw}$  (b) 和  $\text{Cw}$ - $\text{FMw}$  (c) 图解

$\text{TFeO}$ : 全铁;  $\text{Mw}$ :  $w(\text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{TFeO})/100$ ;  $\text{Fw}$ :  $w(\text{TFeO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{TFeO})/100$ ;

$\text{FMw}$ :  $w(\text{TFeO} + \text{MgO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{TFeO} + \text{CaO})/100$ ;  $\text{Cw}$ :  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{TFeO} + \text{CaO})/100$ .

IAG + CAG + CCG: 岛弧花岗岩类 + 大陆弧花岗岩类 + 大陆碰撞花岗岩类; POG: 后造山花岗岩类;

RRG + CEUG: 裂谷花岗岩类 + 大陆造山后抬升阶段花岗岩类 (据 Maniar and Piccoli, 1989). 岩石成分点符号含义同图 2

Fig. 12 The  $\text{SiO}_2$ - $\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$  (a),  $\text{Mw}$ - $\text{Fw}$  (b) and  $\text{Cw}$ - $\text{FMw}$  (c) diagrams of early Cretaceous igneous rocks in the Lower Reaches of Yangtze River

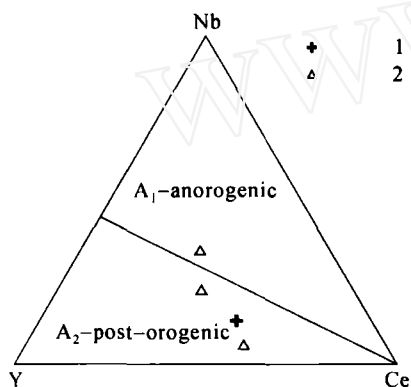


图 13 长江中下游地区早白垩世 A 型花岗岩  $\text{Ce}$ - $\text{Y}$ - $\text{Nb}$  图解

$\text{A}_1$ -anorogenic: 非造山 A 型花岗岩;  $\text{A}_2$ -post-orogenic: 后造山 A 型花岗岩. 1. 大龙山 A 型花岗岩; 2. 苏州 A 型花岗岩

Fig. 13 The  $\text{Ce}$ - $\text{Y}$ - $\text{Nb}$  diagram of early Cretaceous A-type granitoid rocks in the Lower Reaches of Yangtze River

A 型花岗岩类, 其成分点大多数落在岛弧花岗岩类/大陆弧花岗岩类/大陆碰撞花岗岩类的范围内 (图 12)。长江中下游地区早白垩世 A 型花岗岩类 (包括苏州 A 型花岗岩) 的成分点落在后造山花岗岩类的区域及其附近。按照 Maniar 和 Piccoli (1989) 的定义, 他们所指称的后造山花岗岩是指造山地区的变形作用结束后形成的、与造山作用在除时空上均有联系的花岗岩类, 仍属于造山作用的产物, 与 Liegeois (1998) 的后碰撞花岗岩类概念相同。在  $\text{Ce}$ - $\text{Y}$ - $\text{Nb}$  图解中, 大龙山和苏州 A 型花岗岩成分点主要落在代表后碰撞背景的  $\text{A}_2$  型区域, 落入  $\text{A}_1$  型区域的成分点还靠近分界线 (图 13)。在微量元素蛛网图上, 除 A 型花岗岩类外, 长江中下游地区早

白垩世火成岩 (尤其是基性岩) 显示了亏损 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素, 富集 Th、U、La、Ce 等大离子亲石元素的配分形式 (图 14), 不同于富集高场强元素的板内环境火成岩, 而与板块消减带火成岩的地球化学特征相容。

根据上节的讨论, 长江中下游地区早白垩世侵入岩成岩演化的玄武质母岩浆, 在成岩演化第一阶段其深位岩浆房的静岩压力至少大于 1 ~ 1.5 GPa, 暗示当时地壳厚度不小于 35 ~ 50 km。这亦与裂谷伸展背景相矛盾。

长江中下游地区早白垩世火成岩具有随时间演化的成分极性, 即随时间演化呈现富钾、碱质的鲜明特征, 火山岩表现得更为明显。庐枞盆地早白垩世晚期双庙组-浮山组火山岩的钾和总碱含量远远高于早期的龙门院组-砖桥组火山岩 (图 2b, 4b)。宁芜娘娘山组与龙王山组-大王山组火山岩相比, 亦复如此 (图 2a)。宁芜地区侵入岩的钾、总碱含量也高于铜陵、鄂东南-封瑞九地区早白垩世早期侵入岩 (图 2, 4)。

空间上, 长江中下游地区与其周边地区早白垩世火成岩也显现出成分极性。在约 130 ~ 120 Ma 期间, 宁芜和庐枞地区火山岩为高钾的碱性系列岩石组合 (龙王山组-大王山组-姑山组和双庙组-浮山组)。其东到东南方向的溧水、溧阳盆地同时代火山岩属于高钾钙碱性系列。其中溧水火山岩的钾、总碱含量高于溧阳, 前者出现富钾和富硅演化趋势, 而后者仅表现出富硅演化趋势 (汤德平和陈凤贤, 1992)。再向东南, 浙江天目山盆地和浙东同时代火山岩亦属于高钾钙碱性系列, 无富钾演化趋势 (汤德平和陈凤贤, 1992; 李武显和周新民, 2000)。在岩性上, 位于西/西北侧的庐枞和宁芜以钾玄岩 (TAS 定名)、安粗岩为主, 酸性岩的比例小; 而溧水、溧阳、天目山盆地中钾玄岩、安粗岩明显减少, 英安岩和流纹岩比例明显增加; 浙东火山岩以英安质-流纹质为主, 而安山质-玄武质岩石甚少 (汤德平和陈凤贤, 1992; 李武显和周新民, 2000)。

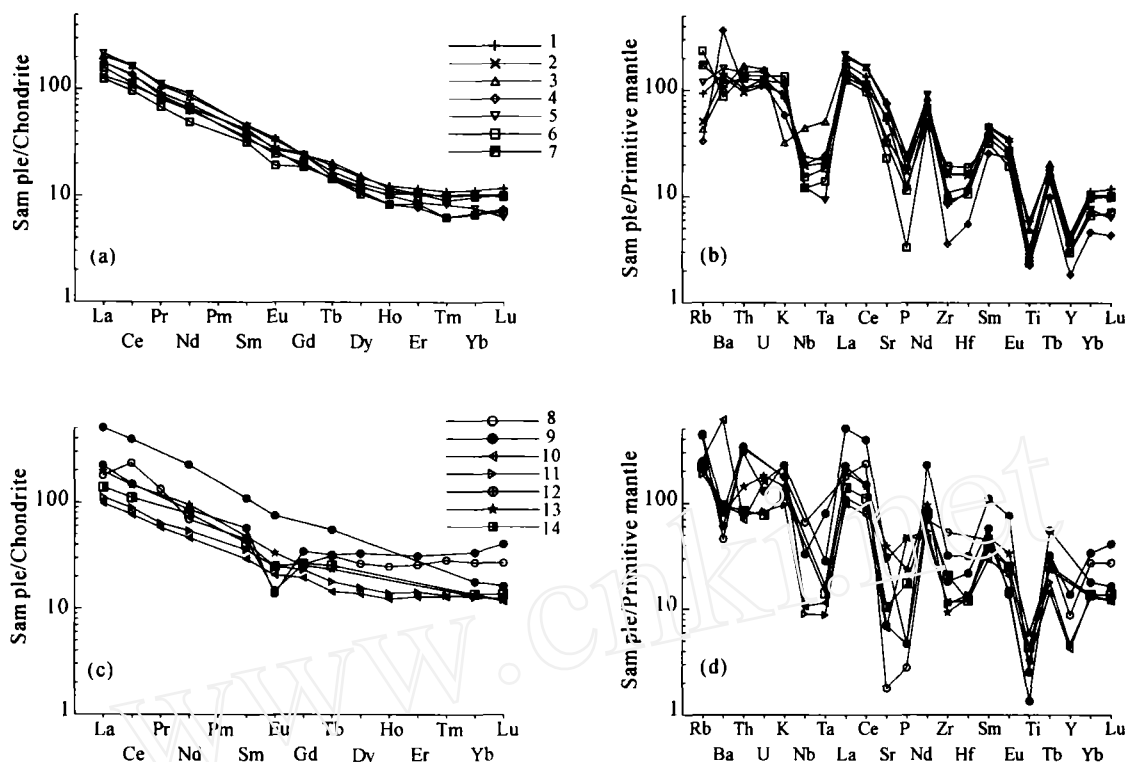


图 14 长江中下游地区早白垩世火成岩稀土配分图解(a, c)和微量元素蛛网图(b, d)

1. 铜陵基性岩(曹山岩体); 2. 铜陵中酸性岩(冬瓜山岩体); 3. 宁芜基性岩; 4. 宁芜中酸性岩(安基山岩体); 5. 怀宁-庐枞-滁县地区早白垩世早期侵入岩(月山岩体); 6. 怀宁-庐枞-滁县地区早白垩世晚期侵入岩(沙溪岩体); 7. 鄂东南-九瑞地区早白垩世侵入岩(封山洞岩体); 8. 大龙山 A 型花岗岩; 9. 苏州 A 型花岗岩; 10. 宁芜地区龙王山组橄榄粗安岩; 11. 宁芜地区大王山组安粗岩; 12. 宁芜地区娘娘山组响岩; 13. 庐枞双庙组钾玄岩; 14. 庐枞龙门院组安粗岩

Fig. 14 The REE pattern (a, c) and spider diagrams (b, d) of early Cretaceous igneous rocks in the Lower Reaches of Yangtze River

前人研究表明,弧岩浆岩具有成分极性(Sakuyama and Nesbitt, 1986; Wilson, 1989)。在空间上,从海沟向内陆岩浆岩碱度升高;随时间演进,岩浆岩组合整体碱度增高。Wilson(1989)指出,与大洋岛弧岩浆岩相比,活动大陆边缘岩浆岩成分以高钾质为主要特征。长江中下游地区及其周边地区同时代的火山岩其类型和岩石化学成分在垂直岩浆带走向上的非对称分布格局,从早期到晚期岩浆岩组合整体碱度增高的现象,以及其具有板块消减带岩浆岩地球化学特征和高钾质含量(汤德平和陈凤贤,1992;李武显和周新民,2000;前述),十分清晰地表明长江中下游地区早白垩世火成岩形成的大地构造背景,应该是与古太平洋板块俯冲密切相关的大陆边缘岩浆弧的内陆一侧,晚期则趋向于弧后环境。

反对长江中下游地区早白垩世火成岩形成于大陆边缘岩浆弧背景的主要理由之一是,当时该地区远离大陆边缘1000 km(Li, 2000; 王元龙等,2001)。但实际上,(1)近年来的研究表明,代表中生代时期亚洲大陆东缘洋陆板块边界的

消减-增生杂岩夹持在浙闽大陆火山岩和台湾中央山脉东翼所代表的晚白垩世板块边界之间(马文璞等,2003);(2)计算长江中下游地区到洋陆板块边界距离时,必须将新生代大陆边缘裂解所导致的伸展量予以扣除;(3)同时,应该沿垂直岩浆弧走向的方位进行距离测算。根据长江中下游地区、皖南浙西到浙东地区早白垩世火山盆地和构造线走向为北东,沿南东方向从庐枞地区到东海盆地中部的直线距离约600 km,与现今智利弧的宽度相当(Doglioni *et al.*, 1999)。

需要指出的是,该构造模式不排斥古太平洋板块的斜向俯冲。Xu and Zhu(1994)、朱光等(2003)认为早白垩世时期古太平洋板块的斜向俯冲不但导致郯庐断裂带的左行平移,而且导致同期的岩浆活动,使得亚洲东部边缘类似于北美西部晚白垩世至古近纪时期由Farallon板块的斜向俯冲导致的转换挤压、岩浆弧环境。因此,长江中下游地区早白垩世早期与Cu等金属矿产相关的岩浆活动应当与早白垩世初(约140 Ma)古太平洋板块的高速斜向俯冲有关(Engbretson *et al.*, 1986; Maruyama *et al.*, 1997)。而早白垩世晚期

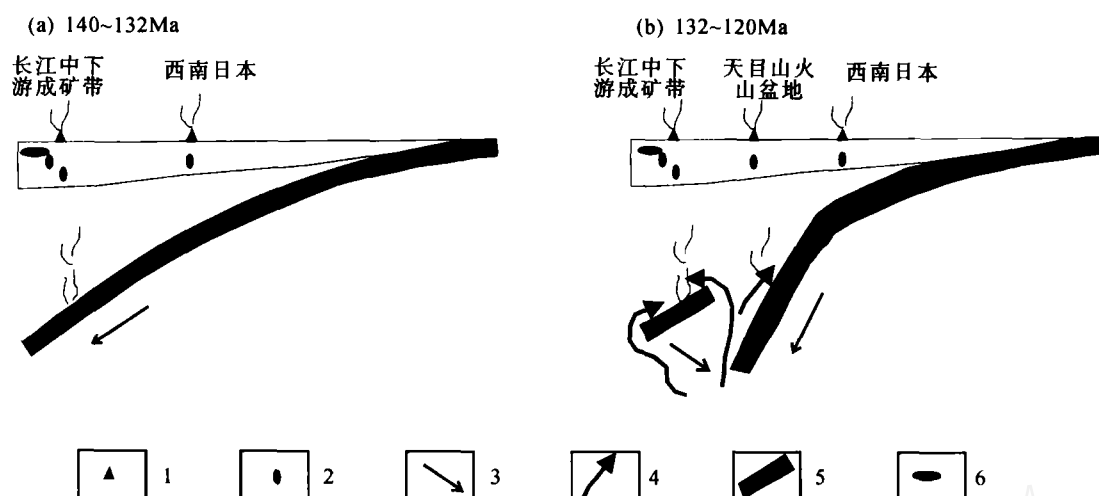


图 15 长江中下游地区及其邻区早白垩世构造模式图

(a) 早白垩世早期; (b) 早白垩世晚期, 俯冲板块向海沟迁移(板片变陡)。

1. 火山; 2. 侵入岩; 3. 板片运动方向; 4. (热的)软流圈地幔的运动方向; 5. 滞留的板片(stalled slab); 6. 矿床

Fig. 15 Tectonic scenarios for the Lower Reaches of Yangtze River and its surrounding regions during Early Cretaceous epoch

(约 130 Ma 之后)俯冲板块变陡(steeptening),诱发造山崩塌和弧后伸展,导致高度富钾火山岩和 A 型花岗岩的形成(图 12)。Wilson (1989)亦指出,活动大陆边缘岩浆岩内陆一侧出现的石榴石碧玄岩及其派生的高钾岩石可能与弧后盆地的形成相关。其大地构造演化模式参见图 15。

## 6 成矿意义

前人在研究区岩浆活动对内生金属成矿作用的宏观制约方面多有论述(如:王德滋等,1996;唐永成等,1998;毛景文等,2003),但没有明确回答形成长江中下游 Cu-Au 成矿带的主导性宏观地质因素究竟是什么。王强等(2002)根据其对该地区埃达克质岩的研究认为,该地区 Cu-Au 等的成矿作用与埃达克质岩有关,下地壳熔融形成的埃达克质岩浆以及形成时释放的流体是富集成矿金属的主要因素。然而,发育被认为是典型的下地壳熔融形成的埃达克质岩的秘鲁却没有大规模的斑岩 Cu 矿床,因此,问题的答案可能不那么简单。

Wyborn 和 Sun (1994)的研究表明,岩浆中硫的饱和度是决定能否形成大型和超大型斑岩 Cu-Au 矿床的关键因素。在地幔熔融时,Cu、Au 等趋向集中于硫化物熔体中,只有当地幔熔融源区呈现高氧化态时,硫化物被氧化从而使得 S 元素进入硅酸盐熔体,此时 Cu、Au 元素才能集中于硅酸盐熔体中(Wyborn and Sun, 1994)。正常的弧岩岩浆其地幔源区的氧逸度不够高,其母岩浆中的 Cu、Au 含量也不高,所以不能形成大型的 Cu-Au 矿床(Mungall, 2002)。对于玄武质下地壳熔融产物而言,其氧逸度也不高(Carmichael, 1991),所以下地壳熔融形成的埃达克质岩浆不一定能够导致 Cu、Au 元

素的富集。俯冲板片洋壳部分的直接熔融产生的埃达克岩熔体,或在高温高压条件下释放的超临界流体(Bureau and Keppler, 1999)则富含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  而具高氧逸度,它们对上覆地幔楔的交代作用可致后者形成高氧化态、富集 S 等挥发份和 Cu、Au 成矿元素的母岩浆(Oyarzun *et al.*, 2001; Mungall, 2002)。对于长江中下游地区而言,早白垩世早期主要受斜向俯冲的影响,而板块斜向俯冲导致的摩擦生热可以满足上述超临界流体形成的条件。早白垩世晚期,俯冲板片变陡使得部分板片被滞留(stalled)在地幔中,其洋壳部分被软流圈地幔加热(参见图 12b)而释放超临界流体。从图 3 可以看出,铜陵、宁芜、鄂东南及封瑞九地区偏基性的侵入岩其 TFeO 含量较高,落入富铁的 TH 区域,正表明长江中下游地区早白垩世时期与 Cu、Au 成矿作用相关的岩浆岩其母岩浆具有高氧逸度。因此,研究区 Cu、Au 等成矿元素在母岩浆中的富集应该归因于来自俯冲板片洋壳部分高温高压下脱水产生的高氧化态超临界流体,而非下地壳熔融形成的埃达克质岩浆。

近年的研究表明,富含 S 元素等挥发份的基性岩浆与长英质地壳物质混合过程中,富  $\text{SO}_2$  的气相挥发份将氧化混合岩浆,使得硬石膏成为稳定的结晶相,而降低岩浆中的 Cu、Au 元素的相容性,为成矿元素从岩浆中分离出来提供了可能(Mathews *et al.*, 1995; Sillitoe, 1997)。从成矿作用的角度看,基性岩浆在高位岩浆房中的 AFC 过程是长江中下游地区早白垩世 Cu 等金属矿床得以形成的重要前提。

Sillitoe (1997)指出,大型-超大型斑岩 Cu-Au 矿床和热液 Au 矿床往往出于岩浆弧发育末期的地质环境中。此时存在有由于俯冲机制的改变而滞留在地幔中的板片(stalled slab),导致形成高氧化态富集 S、Cu、Au 等的母岩浆,其与地

壳物质的混合释放出含 Cu、Au 的热液,最终形成矿床;而相应的岩浆岩组合中往往伴生有碱性系列或橄榄玄粗岩系列的岩石。长江中下游地区 Cu-Au 成矿带的岩浆岩组合特征、成岩机制和形成的大地构造背景均符合上述规律。因此我们认为,长江中下游地区早白垩世岩浆活动及其相关的 Cu-Au 成矿作用是与板块俯冲及其演化过程密切伴生的地质过程。

## 7 结论

(1)长江中下游 Cu-Au 成矿带早白垩世侵入岩(包括埃达克质岩),多数属于高钾钙碱性系列,部分属于钙碱性系列;而火山岩和 A 型花岗岩类主要属于钾质碱性系列,少数为高钾钙碱性系列。与成矿作用有关的中酸性埃达克质侵入岩经历了复杂的成岩过程,至少包括在深位岩浆房(> 35~40 km)的分离结晶和在高位岩浆房内的分离结晶或 AFC 过程两个阶段,同时不排除有下地壳直接熔融形成的埃达克质熔体参与成岩演化的可能性。富钾火山岩则是原生岩浆在深位岩浆房(> 40~50 km 深度)经分离结晶演化的产物。

(2)根据长江中下游地区及其邻区的区域地质构造、早白垩世岩浆岩的岩石化学和地球化学特征和岩浆活动的时空演变特征,判别其在早白垩世早期处于大陆边缘岩浆弧内陆一侧,相应的岩浆活动与古太平洋板块的斜向俯冲作用有关;晚期由于俯冲板片变陡,而发育具有弧后环境特征的岩浆岩。

(3)俯冲作用导致板片洋壳部分释放高氧化态超临界流体,受其影响地幔楔熔融形成富集 S、Cu、Au 等的母岩浆,为长江中下游地区提供了成矿物质来源;而 AFC 成岩过程为 Cu、Au 等元素从岩浆中的释放提供了可能。

**致谢** 感谢吴福元教授提供的他们 2002 年文献的未删节内部文稿。第一作者感谢李献华研究员提供的工作条件和关于埃达克岩的讨论,与李武显博士关于华南中生代大地构造格局的讨论,以及和陈志刚硕士关于橄榄玄粗岩系列(组合)的讨论。最后,感谢三位审稿人的意见。如需要本文涉及的火成岩的详细汇总资料,请与第一作者联系。

## References

- Bureau H, Keppler H. 1999. Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids in the upper mantle: experimental evidence and geochemical implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 165: 187–196.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province. 1987. *Regional Geology of Anhui Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–721. (in Chinese with English summary)
- Carmichael I S E. 1991. The redox states of basic and silicic magmas-A reflection of their source regions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106: 129–141.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991. Copper-iron ore-forming belt in the lower reaches of Yangtze River. Beijing: Geological Publishing House, 1–379. (in Chinese)
- Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Li Xueming, Foland K A, Huang Chengyi, Lu Wei. 1993. Sr and Nd isotopic constraints on source regions of the intermediate and acid intrusions from southern Anhui Province. *Geochimica*, 22(3): 261–268. (in Chinese with English abstract)
- Chen Shangda, Liu Cong, Chen Zhigui, Xu De'an. 1992. Geochemical characteristics and quantitative modeling of diagenetic process of Niangniangshan alkaline series. *Acta Petrologica et Mineralogia*, 11(4): 306–316. (in Chinese with English abstract)
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665.
- Deng Jinfu, Ye Delong, Zhao Hailing, Tang Deping et al. 1992. Volcanism, deep internal processes and basin formation in the Lower Reaches of the Yangtze River. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1–184. (in Chinese with English abstract)
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui. 2002. Classification and nomenclature of igneous rocks. In: Xiao Qinghui (ed.), *The ways of granitoid research*. Beijing: Geological Publishing House, 1–11. (in Chinese)
- Dogliani C, Harabaglia P, Merlini S, Mongelli F, Peccerillo A, Piromallo C. 1999. Orogens and slabs vs. their direction of subduction. *Earth Science Reviews*, 45: 167–208.
- Engelbreton D C, Cox A, Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. *The Geological Society of America Special Paper* 206: 1–59.
- Hoskin P W O, Kinny P D, Wyborn D, Chappell B W. 2000. Identifying accessory mineral saturation during differentiation in granitoid magma: an integrated approach. *Journal of Petrology*, 41: 1365–1396.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8: 523–548.
- Kay R W, Kay S M. 2002. Andean adakites: three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 303–311. (in English)
- Liegeois J P. 1998. Preface – some words on the post-collisional magmatism. *Lithos*, 45: XV–XVII.
- Li Wuxian, Zhou Xinmin. 2000. Geochemical constraints on the petrogenesis of late Mesozoic igneous rocks from the coastal area of Zhejiang and Fujian province. *Progress in Natural Science*, 10(7): 630–641. (in Chinese)
- Li Xian-hua. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 293–305.
- Liu Hong, Qiu Jiansheng, Lo Ching-hua, Xu Xisheng, Ling Wenli, Wang Dezi. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong Basin, Anhui Province: Geochemical constraints. *Geochimica*, 31(2): 129–140. (in Chinese with English abstract)
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua. 1994. Magmatic dynamics of granitoid rocks—Theory, method and examples from granitoid rocks in east Hubei Province. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1–249. (in Chinese)
- Ma Wenpu, Lu Songnian, Wang Guosheng. 2003. Tectonic positioning of the islands of Japan in the Mesozoic Asian frontier and its relation to the regional geology of eastern China. *Geological Bulletin of China*, 22(3): 192–199. (in Chinese with English abstract)
- Mao Jianren, Su Yuxiang, Chen Sanyuan, Yue Yuanzhen, Zhao Shuliang, Cheng Qifen. 1990. The intermediate-acid intrusive rocks and metallization in the middle-lower reaches of the



- Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 191. (in Chinese)
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, Wang Yitian, Niu Baogui. 2003. Geodynamic background of the large - scale Mesozoic metallogenesis in North China and its adjacent regions: some inspiration from fine dating on ore - forming age. *Science in China (Series D)*, 33(4): 289 - 299. (in Chinese)
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635 - 643.
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6: 121 - 142.
- Matthews S J, Sparks R S J, Gardeweg P M C. 1995. The relationships between magma mixing and volatile behaviour in the Lascar volcano (23(22 S, 67(44 W), northern Chile: significance for the formation of copper sulphide and magnetite - apatite orebodies. In: Clark A H (ed.), *Giant Ore Deposit - II*. Kingston, Ontario: QMinEx, Department of Geological Sciences, Queen's University, 146 - 181.
- Meen J K. 1990. Elevation of potassium content of basaltic magma by fractional crystallization: the effect of pressure. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 309 - 331.
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274: 321 - 355.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13: 97 - 108.
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: slab melting and the genesis of major Au and Au - rich Cu deposits. *Geology*, 30(10): 915 - 918.
- Ning Renzu, Chen Gensheng. 1989. REE characteristics of Yenshanian intrusive rocks from Ningzhen. *Geochimica*, 18(1): 52 - 61. (in Chinese with English abstract)
- Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, Lopez I, Rivera S. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc - alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36: 794 - 798.
- Qiu Ruilong. 1992. Petrological characteristics and genesis of high - K diorites in Yueshan, Anhui Province. *Geological Review*, 38(2): 97 - 108. (in Chinese with English abstract)
- Petford N, Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37: 1491 - 1521.
- Sajona F G, Maury R C. 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *CR Acad Sci II A*, 326(1): 27 - 34.
- Sakuyama M, Nesbitt R W. 1986. Geochemistry of the Quaternary volcanic rocks of the northeast Japan arc. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 29: 413 - 450.
- Sillitoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper - gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44: 373 - 388.
- Tang Deping, Chen Fengxian. 1992. Petrogenesis and evolution of Mesozoic volcanic rocks. In: Deng Jinfu, Ye Delong, Zhao Hailing, Tang Deping et al. (eds.) *Volcanism, deep internal processes and basin formation in the Lower Reaches of the Yangtze River*. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 44 - 121. (in Chinese)
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, Xing Fengming, Wang Yongmin, Cao Fenyang, Chang Yinfo. 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the Along-Changjiang Area of Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 351. (in Chinese with English summary)
- Tao Kuiyuan. 1988. The basic characteristics of the Mesozoic volcanism in the southeast coastal area of China. *Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources*, 9: 12 - 30. (in Chinese with English abstract)
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. 1997. Epithermal and porphyry deposits: the adakite connection. *CR Acad Sci II A*, 325(2): 103 - 109.
- Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng. 1996. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China and their metallogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 23 - 34. (in Chinese with English abstract)
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Xu Jifeng. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite - porphyrites, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30(4): 353 - 362. (in Chinese with English abstract)
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, Li Xianhua, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Liu Yimao. 2002. Yanshanian adakite - like rocks and metallization in the eastern part of Yangtze Block. *Science in China (Series D)*, 32(Sup.): 127 - 136. (in Chinese)
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei. 2003. Petrogenesis of the Yanshanian intrusive rocks in Tongling area of Anhui Province and its constraints on deep dynamic process. *Science in China (Series D)*, 33(4): 324 - 334. (in Chinese)
- Wang Yuanlong, Zhang Qi, Wang Yan. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 565 - 575. (in Chinese with English abstract)
- Watson E B, Capobianco C J. 1981. Phosphorus and the rare earth elements in felsic magmas: an assessment of the role of apatite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 2349 - 2358.
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. London: Unwin and Hyman, 1 - 466.
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, Zhang Chenghuo, Huang Wenming. 1996.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology of intrusive rocks from Tongling. *Acta Petrologica et Mineralogia*, 15(4): 299 - 306. (in Chinese with English abstract)
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou. 2002. Adakite: its concept, identify markers and geological significance. In: Xiao Qinghui (ed.), *The ways of granitoid research*. Beijing: Geological Publishing House, 172 - 191. (in Chinese)
- Wu Liren, Qi Jinying, Wang Tingdu. 1982. The Mesozoic volcanic rocks in eastern China. *Acta Geologica Sinica (Chinese Edition)*, 56(3): 223 - 234. (in Chinese with English abstract)
- Wyborn D, Sun S-S. 1994. Sulphur - undersaturated magmatism—A key factor for generating magma - related copper - gold deposits. *AGSO Research Newsletter*, 21: 7 - 8.
- Xing Fengming, Xu Xiang. 1999. Yangtze magmatic belt and mineralization in Anhui Province. Hefei: Anhui People's Press, 1 - 170. (in Chinese with English abstract)
- Xu Jifeng, Wang Qiang, Xu Yigang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate - acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 576 - 584. (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 J W, Zhu G. 1994. Tectonic models of the Tan-Lu fault zone, eastern China. *International Geology Review*, 36: 771 - 784.
- Xu Zhigang, Sheng Jifu, Sun Shanping. 1999. A discussion on characteristics of shoshonite rock series (association) and some problems. *Geological Review*, 45(suppl.): 43 - 62. (in Chinese)

- with English abstract)
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang Jinhui, Wang Yuanlong, Zhao Taiping, Guo Guangjun. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the Mesozoic adakites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236–244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi, Wang Yuanlong, Qian Qing, Wang Yan, Xue Huaimin. 2003. SHRIMP dating of the zircons in volcanic rocks from Nanjing – Wuhu area and its implications. *Science in China (Series D)*, 33(4): 309–314. (in Chinese)
- Zhou Xunruo, Ren Jin. 1994. Mesozoic granitoid rocks in the middle – lower reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 1–119. (in Chinese)
- Zhu Guang, Liu Guosheng, Niu Manlan, Song Chuansong, Wang Daoxuan. 2003. Transcurrent movement and genesis of the Tan-Lu fault zone. *Geological Bulletin of China*, 22(3): 200–207. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 安徽省地矿局. 1987. 安徽省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–721.
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1–379.
- 陈江峰, 周泰禧, 李学明, Foland K A, 黄承义, 卢伟. 1993. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩的源区、成因同位素制约. *地球化学*, 22(3): 261–268.
- 陈上达, 刘聪, 陈志贵, 徐德安. 1992. 娘娘山碱性火山 – 侵入岩特征及成岩定量模拟. *岩石矿物学杂志*, 11(4): 306–316.
- 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 汤德平. 1992. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–184.
- 邓晋福, 肖庆辉. 2002. 火成岩的分类命名及相关术语和名词. 见: 肖庆辉 主编, 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 1–11.
- 李武显, 周新民. 2000. 浙闽沿海晚中生代火成岩成因的地球化学制约. *自然科学进展*, 10(7): 630–641.
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 徐夕生, 凌文黎, 王德滋. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约. *地球化学*, 31(2): 129–140.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华. 1994. 花岗岩类岩浆动力学 – 理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–249.
- 马文璞, 陆松年, 王果胜. 2003. 日本在亚洲前沿的构造定位及其对中国东部区域构造的含义. *地质通报*, 22(3): 192–199.
- 毛建仁, 苏郁香, 陈三元, 岳元珍, 赵曙良, 程启芬. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿. 北京: 地质出版社, 1–191.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精确测得的启示. *中国科学 D 辑*, 33(4): 289–299.
- 宁仁祖, 陈根生. 1989. 宁镇地区燕山期侵入岩的稀土元素特征. *地球化学*, 18(1): 52–61.
- 邱瑞龙. 1992. 安徽月山高钾闪长岩岩石学特征及岩石成因探讨. *地质论评*, 38(2): 97–108.
- 汤德平, 陈凤贤. 1992. 中生代火山岩的成因与演化. 见: 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 汤德平. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成. 武汉: 中国地质大学出版社, 44–121.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1–351.
- 陶奎元. 1988. 中国东南沿海中生代火山作用基本特征. *南京地质矿产研究所所刊*, 9: 12–30.
- 王德滋, 任启江, 邱检生. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. *地质学报*, 70(1): 23–34.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长岩的的证据. *地球化学*, 30(4): 353–362.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 李献华, 熊小林, 包志伟, 刘义茂. 2002. 扬子地块东部燕山期埃达克岩 (adakite – like) 岩与成矿. *中国科学 D 辑*, 32(增刊): 127–136.
- 王强, 许继峰, 赵振华, 熊小林, 包志伟. 2003. 安徽铜陵地区侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约. *中国科学 D 辑*, 33(4): 324–334.
- 王元龙, 张旗, 王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义. *岩石学报*, 17(4): 565–575.
- 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 张成火, 黄文明. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究. *岩石矿物学杂志*, 15(4): 299–306.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有. 2002. 埃达克岩的概念、识别标志及其地质意义. 见: 肖庆辉 主编, 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 172–191.
- 吴利仁, 齐进英, 王听渡. 1982. 中国东部中生代火山岩. *地质学报*, 56(3): 223–234.
- 邢凤鸣, 徐祥. 1999. 安徽扬子岩浆岩带与成矿. 合肥: 安徽人民出版社, 1–170.
- 许继峰, 王强, 徐义刚, 赵振华, 熊小林. 2001. 宁镇地区中生代安山岩中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钽的岩浆产生的限制. *岩石学报*, 17(4): 576–584.
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 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.
- 张旗, 简平, 刘敦一, 王元龙, 钱青, 王焰, 薛怀民. 2003. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. *中国科学 D 辑*, 33(4): 309–314.
- 周珣若, 任进. 1994. 长江中下游中生代花岗岩. 北京: 地质出版社, 1–119.
- 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 宋传中, 王道轩. 2003. 祁连山断裂带的平移运动与成因. *地质通报*, 22(3): 200–207.