

•综述与进展•

## Sanukite( 赞岐岩) 的地球化学特征 成因 及其地球动力学意义

张 旗<sup>1</sup>, 钱 青<sup>1</sup>, 翟明国<sup>1</sup>, 金惟浚<sup>1</sup>, 王 焰<sup>2</sup>, 简 平<sup>3</sup>, 王元龙<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 香港大学 地球科学系, 香港;

3. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

**摘 要:** 赞岐岩(サヌカイト, sanukite) 是指发现于日本四国北部的一种富 Mg 的火山岩, 主要产于日本中新世(11~14 Ma) Setouchi 火山岩带, 是一种黑色玻璃质的火山岩。其化学成分以富 Si 质(安山-英安质)、具很高的 Mg<sup>#</sup> 值(> 0.6)、高的 Cr、Ni 丰度和 K/Na 值(0.33~0.52) 为特征。赞岐岩的形成与菲律宾海板块年轻的热的岩石圈俯冲和四国盆地的张开有关, 产于岛弧的弧前或弧后盆地环境。赞岐岩不只代表火山岩, 也包括侵入岩。Shirey 和 Hanson (1984) 将该术语引入太古宙, 将太古宙具上述赞岐岩特征(Si 过饱和、Mg<sup>#</sup> 高和 Ni、Cr、LILE 含量高) 的深成岩和火山岩称为 sanukite 岩套。赞岐岩与埃达克岩具有大体类似的地球化学特征, 但前者更富 Mg、Cr 和 Ni, 表明赞岐岩可以直接由地幔岩部分熔融形成, 而埃达克岩只能由玄武岩部分熔融形成。现代的赞岐岩很少见, 而太古宙的赞岐岩比较常见, 暗示太古宙导致板片熔融的消减的岩石圈本身或上地幔可能具有更高的温度。赞岐岩集中出现在晚太古代(< 3.0 Ga), 表明板块消减作用可能在 3.0 Ga 之后才成为一个重要的过程, 晚太古代赞岐岩的出现可能标志着现代类型板块构造的开始。

**关键词:** Sanukite(赞岐岩); 埃达克岩; 地球化学; 岩石成因

中图分类号: P588.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)02-0117-09

### Geochemistry, petrogenesis and geodynamic implications of sanukite

ZHANG Qi<sup>1</sup>, QIAN Qing<sup>1</sup>, ZHAI Ming\_guo<sup>1</sup>, JIN Wei\_jun<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, JIAN Ping<sup>3</sup> and WANG Yuan\_long<sup>1</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Department of Earth

Sciences, University of Hong Kong, Hong Kong, China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological

Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Sanukite is a type of black vitreous Mg-rich volcanic rocks first recognized in the northern part of Shikoku in Japan. It occurs mainly in the Miocene (11~14 Ma) Setouchi volcanic belt, and is typically high in Mg number ( $Mg/(Mg+Fe^{2+}) > 0.6$ ), SiO<sub>2</sub> (andesitic to dacitic), Cr and Ni contents and K/Na ratios (0.33~0.52). The Setouchi sanukite is located in fore- or back-arc basins, and originated in subduction of the young and hot Philippine Sea plate and pull-apart of the Shikoku basin. Shirey and Hanson (1984) first used 'sanukitoid' to name some Archaean intrusive and extrusive rocks with the above geochemical characteristics. Geochemically, sanukite resembles adakite except for somewhat higher Mg, Cr and Ni contents, indicating that it can be produced directly from a mantle source through partial melting, whereas adakite is merely produced by partial

收稿日期: 2004-12-08; 修订日期: 2005-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40472047); 国家自然科学基金重点基金资助项目(40234045); 中国科学院知识创新工程基金资助项目(KZCX1\_07, KZCX2\_SW\_119)。

作者简介: 张 旗(1937-), 男, 研究员, 岩石学和地球化学专业, E-mail: zhangqi1218@vip.sina.com。

melting of a basaltic source. Sanukite is widespread in Archaean, indicating a higher geotherm of the mantle wedge or the subducting plate. The early sanukite has only been found in Late Archaean ( $< 3.0$  Ga), probably indicating that the modern style plate tectonics was initiated at that time and that plate subduction came to be an important geological process only after 3.0 Ga.

**Key words:** sanukite; adakite; geochemistry; petrogenesis

赞岐岩 (sanukite) 是最早发现于日本四国北部的一种富 Mg 的火山岩, 以富 Si、MgO 和  $Mg^{\#}$  值高、富 Cr 和 Ni 为特征, 通常认为是富集 LREE 的地幔楔部分熔融形成的, 产于年轻的热的俯冲带之上的弧前或弧后盆地环境。赞岐岩与埃达克岩有类似的特征, 但是具有不同的成因。现代的赞岐岩出露很少, 但是相关的侵入岩 (高镁闪长岩) 在晚太古代比较常见, 说明现代板块构造体制不同于太古宙。由于赞岐岩的形成需要特殊的条件, 而且它是晚太古代常见的岩石, 对于了解地球早期演化和板块构造起源具有重要的意义, 因此, 近来受到国际地质学界的广泛关注。Lithos 杂志于 2005 年 1 月出版了一期专集 (第 79 卷、第 1~2 期) 集中探讨了埃达克岩、TTG 和赞岐岩的关系及其地球动力学意义。目前, 关于埃达克岩和赞岐岩的关系以及它们的区别和成因备受关注, 许多问题还没有定论, 还在探讨之中, 尤其是将埃达克岩与 TTG 以及赞岐岩联系起来, 必将引发对固体地球科学更加深刻的思考。本文简要介绍赞岐岩的特征、与埃达克岩的对比及其地质意义。由于笔者的水平所限, 有许多理解不当之处, 欢迎批评指正。

## 1 赞岐岩的特征

赞岐岩 (サヌカイト, sanukite) 于 19 世纪末由 Weinschenk (1890) 首次描述, 指发现于日本四国北部的一种富 Mg 的火山岩。日本按照其矿物组成将其译为“古铜辉石安山岩”, 又根据其发现地 Sanuki 的中文译名“赞岐”称其为“赞岐岩”, 我国出版的英汉地质词典则译为“玻基方辉安山岩”。

赞岐岩主要产于日本中新世 (11~14 Ma) 的 Setouchi 火山岩带, 是一种黑色玻璃质的火山岩, 由玻璃、斜方辉石、磁铁矿和斜长石组成, 可含少量橄榄石、斜方辉石和/或单斜辉石斑晶, 敲击可产生清脆的响声, 可作为乐器使用。其化学成分以富 Si 质 (安山-英安质)、高的  $Mg^{\#}$  值 ( $> 0.6$ ) 和较高的 Cr、Ni 含量及 K/Na 值 (0.33~0.52) 为特征, 富集 LILE 和

LREE, 通常具弱的负铕异常, 亏损高场强元素 (表 1)。实验研究表明它们是在大约 1110~1070 °C、1.1~1.0 GPa 和 7%~8%  $H_2O$  的条件下, 由橄榄石+斜方辉石或橄榄石+斜方辉石+单斜辉石的地幔岩石部分熔融形成的 (Tatsumi and Ishizaka, 1982)。

赞岐岩不只代表火山岩, 也包括侵入岩。20 年前, Shirey 和 Hanson (1984) 即将该术语引入太古宙, 将太古宙具上述赞岐岩特征 (Si 过饱和、 $Mg^{\#}$  和 Ni、Cr、LILE 含量高) 的深成岩和火山岩称为 sanukite 岩套。太古宙喷出的高镁安山岩很少见, 而类似的侵入岩 (高镁闪长岩) 虽然出露也较少 (不超过太古宙露头的 5%, Smithies *et al.*, 2003), 但是在大多数晚太古代地体中有广泛的分布 (如: 加拿大、芬兰、乌克兰、俄罗斯、印度、津巴布韦、澳大利亚和格陵兰等地), 时代是 3.0~2.5 Ga, 主要集中在 2.7~2.5 Ga 期间 (张旗等, 2004)。

赞岐岩的侵入岩部分为闪长岩-二长闪长岩-花岗闪长岩岩套 (diorite-monzodiorite-granodiorite, DMG), 成分变化大, 可以从角闪辉长岩、闪长岩、二长闪长岩、石英正长岩、花岗闪长岩变化为花岗岩, 表明在岩浆形成过程中有结晶分离作用的影响 (Lobach-Zhuchenko *et al.*, 2003)。如 Kurgenlampi lopolith (Baltic, 约 200 m 厚) 底部为闪长岩, 由于磷灰石和角闪石的堆晶作用, 顶部变为花岗闪长岩。有些赞岐岩还伴有镁铁-超镁铁质岩石 (如 Shaaravalampi、Panozero in Karelia、Roaring River Complex、Lac des Iles pluton 和 OttoStock, 据 Stern and Hanson, 1991)。在 Panozero 深成岩中, 超镁铁质岩呈网脉状穿入长英质岩, 堆晶岩或作为爆发角砾岩的碎块形成岩管和岩墙。

Shirey 和 Hanson (1984) 最初定义的赞岐岩为二长闪长岩-粗面安山岩 (高镁闪长岩), 其  $Mg^{\#} > 60$ , Ni 和 Cr  $> 100 \mu\text{g/g}$ , Sr 和 Ba  $> 500 \mu\text{g/g}$ , 富 LREE [(Ce/Yb)<sub>N</sub> = 10~50, Ce<sub>N</sub>  $> 100$ ] 和 LILE 如 K、Sr、Zr 和 Nb 等, 亏损 HREE (Yb<sub>N</sub> = 6~12), 无 Eu 异常或有弱的负 Eu 异常, 表明太古宙高镁闪长岩的主要地球化学特征类似于日本新生代的高镁安山岩

表 1 日本中新世 sanukites(赞岐岩)的主量( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )化学成分  
 Table 1 Chemical composition ( $w_B/\%$ ) and trace element abundance ( $w_B/10^{-6}$ ) of sanukites in Japan

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
样号	98070505	SD_261	OT6_2	OT_S	TG1_5	NBY_5	SD407	SD411	SD812	Setouchi 平均	安山岩平均
SiO <sub>2</sub>	55.14	55.37	51.68	53.18	57.27	55.86	56.12	55.8	56.33	57.4	60
TiO <sub>2</sub>	0.71	0.65	0.93	0.94	0.42	0.4	0.62	0.61	0.61	0.7	0.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.97	15.55	13.68	14.36	14.26	14.25	15.38	15.41	16.48	15.6	17.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.75	6.92	8.36	9.7	6.19	6.86	6.87	6.84	6.19	6.3	6.1
MnO	0.16	0.17	0.13	0.15	0.12	0.12	0.14	0.14	0.11		
MgO	9.65	6.89	10.19	8.64	9.45	10.95	7.61	7.77	7.19	8.7	3.4
CaO	10.81	7.04	7.52	7.84	6.31	7.11	6.87	6.92	6.97	6.8	7.1
Na <sub>2</sub> O	2.21	2.84	2.41	2.17	2.57	2.32	2.87	2.64	3.06	2.8	3.7
K <sub>2</sub> O	0.71	2.25	1.39	1.28	1.16	1.12	2.38	2.42	2.04	1.7	1.6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.17	0.19	0.19	0.1	0.11	0.16	0.16	0.16		
Total	100.64	97.85	96.47	98.45	97.85	99.1	99.03	98.71	99.15		
Mg <sup>#</sup>	0.73	0.68	0.72	0.65	0.76	0.77	0.7	0.71	0.71	0.74	0.54
Cr	474	342	595	576	534	535				451	56
Ni	36	148	208	234	179	254	132	126	151	203	18
Sr	220	267	265	331	308	284	249	253	299		
Ba	174	195	297	359	336	378	211	213	263		
Rb	14	114	46	66	45	48	119.3	121.3	68.4		
Y	21	15	14	37	11	11	16	16	13		
Zr	85	80	114	118	94	68	82	82	109		
Th	3.82	4.8	3.4	4.2	4.9	3	4.7	4.6	5.3		
Nb	7	5	6	6	3	2	4	4	5		
Pb		17	7	10	13	11					
La	5.7	9.17	14.1	15.8	12.2	9.49				12.5	11
Ce	25	21.6	33.7	59.4	22.5	18.2					
Pr	2.94										
Nd	12.2										
Sm	3.13	2.48	3.51	3.62	2.37	2.04					
Eu	1.01	0.85	0.98	1.03	0.69	0.62					
Gd	3.26										
Tb	0.59	0.49	0.48	0.52	0.4	0.32					
Dy	3.54										
Ho	0.73										
Er	2.24										
Tm	0.33										
Yb	2.01	1.55	1.88	1.88	1.49	1.38				1.6	1.9
Lu	0.29	0.26	0.3	0.32	0.21	0.21					

1—Kamei *et al.* (2004); 2~ 6—Tatsumi *et al.* (2003); 7~ 9—Shimoda *et al.* (1998); 10~ 11—Tatsumi and Ishizaka (1982); 产地: 1 为 Kyushu 岛, 2~ 9 为 Setouchi 火山带。

(sanukite), 推测是交代地幔部分熔融形成的, 并伴有明显的分离结晶作用的影响 (Shirey and Hanson, 1984; Stern and Hanson, 1991)。但是, 太古宙赞岐岩和新生代赞岐岩的微量元素特征也有区别, 例如, 太古宙高镁闪长岩的 La/Yb 值和 Sr/Ba 含量比新生代赞岐岩高; 相反, 在这方面, 太古宙赞岐岩更加类似于受到地幔混染的埃达克岩 (Yogodzinski *et al.*, 1995), 暗示太古宙赞岐岩与受到地幔混染的埃达克岩可能具有类似的成因 (Smithies and Champion,

2000)。

赞岐岩类非常重要的特征是具有正的  $\epsilon_{Nd}(t)$  (+ 2.0~ - 0.3, Kovalenko *et al.*, 2003)、地幔的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素组成 (0.700 0~ 0.702 1, Kovalenko *et al.*, 2003) 以及地壳的 Pb 同位素成分 (Stevenson *et al.*, 1999)。锆石有较强的抵抗变质作用、化学、热和机械应力的能力, 可以保存 TTG 原始的同位素信息。研究发现, 在赞岐岩和 TTG 中的锆石具有不同的特征: 来自 TTG 的锆石具有极低的  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$

值( $< 0.15$ , 相应的  $\text{Th}/\text{U} < 0.55$ ), 而来自赞岐岩的锆石的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} > 0.2$ ( $\text{Th}/\text{U} > 0.75$ ); 赞岐岩类的锆石与TTG比较, 具有较高的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 和氧同位素组成, 暗示地壳流体同化作用的影响。因此, 赞岐岩类全部同位素特征( $\epsilon\text{Nd}(t)$ 、 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 、 $\epsilon\text{Sr}(t)$ 和 $\text{Th}/\text{U}$ 值)表明其来源于地幔楔的熔融, 但是流体被地壳交代, 因此, 具有地壳的O和Pb同位素特征(Stern and Hanson, 1991; Rapp *et al.*, 1999)。Halla (2005)对芬兰晚太古代赞岐岩的 $\text{Sr}/\text{Nd}$ 同位素研究表明, 赞岐岩是地幔成因的, 而Pb同位素资料说明其地幔源区有明显的地壳组分的影响, 反映了地壳Pb通过晚太古代沉积物的消减作用发生了再循环, 地壳Pb是经由板片交代的流体进入赞岐岩地幔源区的。Shimoda等(1998)的研究也揭示了消减的沉积物组分对赞岐岩形成有重要的贡献。

Setouchi火山带(11~16 Ma)在日本西南地区延伸约600 km, 表明在这个有限的地区内形成的赞岐岩(高镁安山岩)可能处于异常的构造环境, 可能与菲律宾海板块年轻的热的岩石圈俯冲和四国盆地的张开有关(Tatsumi *et al.*, 2003), 产于岛弧的弧前或弧后环境。

据文献报道, 除了中新世和晚太古代外, 在早白垩世(120 Ma, Tsuchiya *et al.*, 2005)和晚前寒武纪(610~625 Ma, Beyth *et al.*, 1994)也有赞岐岩类出露。我国对于赞岐岩的研究开展较晚, 莫宣学等(1993)报道的四川乡城玻镁安山岩可能类似于赞岐岩。巫祥阳等(2002)将鲁西高镁闪长岩与太古宙高镁闪长岩、新生代高镁安山岩以及埃达克岩做了对比, 认为鲁西多数高镁闪长岩具有埃达克质岩石的成分特点, 相比更接近Piip型高镁安山岩(sanukite)。

## 2 赞岐岩与埃达克岩的对比

在岩石组合方面, 与埃达克岩类似的是, 它们均不是具体岩石的术语, 可以是火山岩, 也可以是侵入岩。不同的是, 赞岐岩的组成中不仅有中酸性的, 还有基性的辉长岩, 还可以与超镁铁岩伴生, 表明赞岐岩可以直接由地幔岩部分熔融形成, 而埃达克岩只能由玄武岩部分熔融形成。

在地球化学特征上, 埃达克岩和赞岐岩都是富Si质的, 不同在于赞岐岩限定 $\text{SiO}_2 > 52\%$ , 而埃达克岩通常 $\text{SiO}_2 > 56\%$ ; 赞岐岩相对富MgO(通常MgO

$> 5\%$ , 可高达12%),  $\text{Mg}^\#$ 为0.45~0.75; 而埃达克岩MgO通常 $< 3\%$ , 很少 $> 6\%$ 。根据世界上发表的赞岐岩的实例, 其地球化学特征大体类似于埃达克岩, 如富集LILE(Sr、Ba、Th和P等), 亏损HREE, La/Yb、Sr/Rb和Sr/Y值较高。不同的是, 赞岐岩的 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量变化大, 有的可高达1.5% (Kovalenko *et al.*, 2003), 而埃达克岩相对贫 $\text{P}_2\text{O}_5$ 。埃达克岩一个重要的特点是富Sr( $> 400 \times 10^{-6}$ ), 表明埃达克岩熔融时斜长石不稳定而全部进入岩浆。而赞岐岩的Sr含量是变化的, 有的较高, 如晚太古代赞岐岩, 平均 $> 500 \times 10^{-6}$ (表2, Rollison and Martin, 2005); 有的却很低, 如日本Setouchi, 大多 $< 300 \times 10^{-6}$ (表1, Shimoda *et al.*, 1998; Kamei *et al.*, 2004)。在图1中, Setouchi赞岐岩落在埃达克岩范围之内, 接近岛弧玄武岩-安山岩-英安岩区域。埃达克岩由于熔融的源区有石榴石残留, 故强烈亏损HREE(如 $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ )和Y( $< 18 \times 10^{-6}$ ), 而赞岐岩的Y和Yb也是变化的, 有些与埃达克岩类似, 有的略高一些(图2B和C), 因此, 其REE分布型式具LREE强烈富集型和略富集型的区别。埃达克岩通常具正钬异常或弱的负钬异常, 而赞岐岩通常具弱的负钬异常。

表2 埃达克岩、TTG和赞岐岩地球化学特征对比(Rollison and Martin, 2005)

Table 2 Main geochemical features of adakites, TTGs and sanukites (Rollison and Martin, 2005)

	埃达克岩	TTG	赞岐岩
$\text{SiO}_2$ (w_B/%)	$> 56$	平均70	55~60
$\text{Mg}^\#$	平均0.51	平均0.43	$> 0.60$
$\text{Ni}$ (w_B/ $10^{-6}$ )	平均24	平均14	$> 100$
$\text{Cr}$ (w_B/ $10^{-6}$ )	平均36	平均29	$> 200$
$\text{Sr}$ (w_B/ $10^{-6}$ )	$> 400$	$> 400$	$> 500$
Sr/Y	$> 40$	$> 40$	平均50
(La/Yb) <sub>n</sub>	$> 40$	15~100	19~65
Y(w_B/ $10^{-6}$ )	$< 18$	$< 15$	平均17
Yb(w_B/ $10^{-6}$ )	$< 1.9$	$< 1.6$	平均2
文献出处	Kav. 1978; Defant and Drummond, 1990	Martin, 1994	Shirev and Hanson, 1984; Stern and Hanson, 1991

Kamei等(2004)研究了日本九州岛早白垩世(121 Ma)的赞岐岩, 并将高镁安山岩(HMA)分为4类: sanukitic HMA、adakitic HMA、bajaitic HMA和boninitic HMA, 指出赞岐岩是地幔橄辉岩与来自消

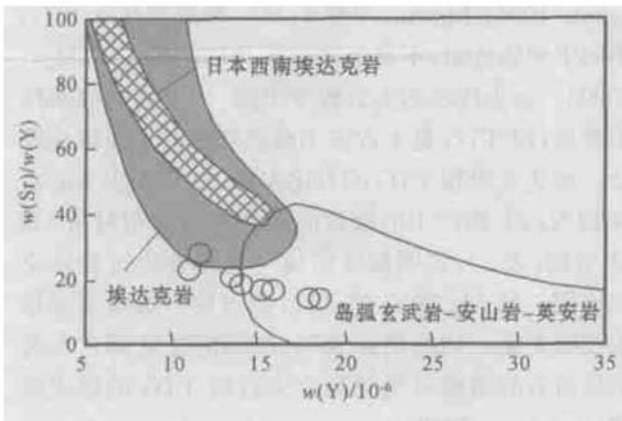


图 1 埃达克岩与赞岐岩的 Sr/Y - Y 图 (Shimoda *et al.*, 1998)

Fig. 1 Sr/Y versus Y diagram for adakite and sanukite in Japan (Shimoda *et al.*, 1998)

减的洋壳板片或沉积物部分熔融的富 Si 质熔体平衡反应形成的 (Yogodzinski *et al.*, 1994; Shimoda *et al.*, 1998)。埃达克岩是消减的板片(或板片+沉积

物)部分熔融形成的,与地幔橄榄岩有少量物质交换作用 (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Yogodzinski *et al.*, 1995; Stern and Kilian, 1996), 相比赞岐岩质高镁安山岩,埃达克质高镁安山岩具有较高的 Sr、Sr/Y 和 (La/Yb)<sub>N</sub> (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999)。Bajaites 是一种少见的岩石,通常认为是地幔橄榄岩与来自消减板片部分熔融的富 Si 质熔体不平衡反应形成的 (Saunders *et al.*, 1987)。bajaitic HMA 与 adakitic HMA 的微量元素特征接近 (图 2A-C), 成因也与 adakite 类似 (Rogers *et al.*, 1985; Drummond and Defant, 1990; Yogodzinski *et al.*, 1994)。玻安岩则是消减带之上亏损的残留地幔含水熔融形成的 (Crawford *et al.*, 1989), 相对于上述 3 类高镁安山岩, boninitic HMA 的 TiO<sub>2</sub>、HFSE、LREE 和 LILE 含量最低 (Hickey and Frey, 1982), 是最亏损的火山岩 (图 2)。

埃达克岩和赞岐岩富 LILE, 亏损 HREE 和 Y。

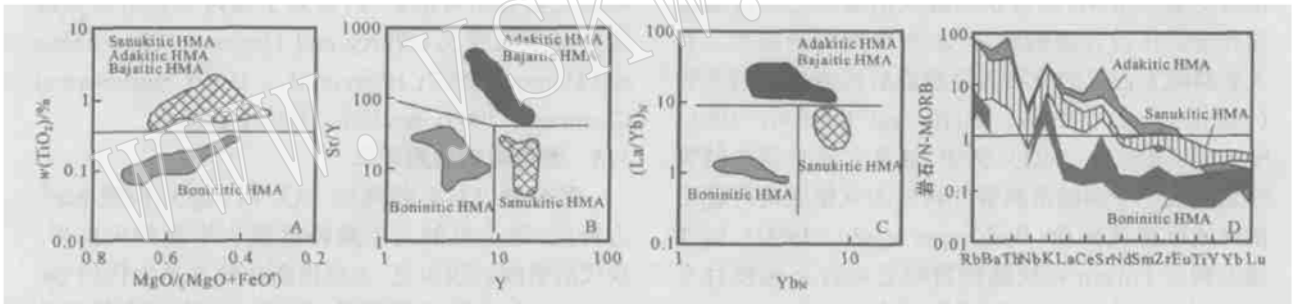


图 2 赞岐岩与埃达克岩、玻安岩和 bajaite 的对比 (Kamei *et al.*, 2004)

Fig. 2 Comparison of sanukitic HMA to adakitic HMA, boninitic HMA and bajaitic HMA. (Kamei *et al.*, 2004)

埃达克岩通常被解释为是具玄武岩成分的板片部分熔融形成的, 熔融的残留物为石榴石(+辉石±角闪石); 如果埃达克岩同时富 Mg (> 3%), 相当于富 Mg 安山岩, 则表明熔体上升过程中与地幔楔发生了混合。而对于赞岐岩来说, 有两种可能: 板片熔融并与地幔楔混合, 或含水的地幔楔直接部分熔融形成。因为赞岐岩富 Mg, 不可能由玄武岩直接熔融形成, 地幔对其必定具有重要的影响。

埃达克岩由于成因和源区不同, 其地球化学特征可以有比较宽的范围。如果是下地壳基性岩或底侵玄武岩部分熔融形成的, 则更加富 K 和贫 Mg、Cr、Ni; 如果是消减的板片部分熔融的, 则贫 K; 如果熔体与地幔楔发生了交换作用, 则富集 Mg、Cr 和 Ni, 具有高 Mg 安山岩的特征。赞岐岩大体类似于

富 Mg 的埃达克岩, 而明显不同于贫 Mg 的埃达克岩。

最近, Martin 等 (2005) 将埃达克岩分为两类: 一类为高 Si 埃达克岩 (high\_silica adakites), 为板片熔融的, 常与地幔楔发生交换作用, 类似于晚太古代的 TTG; 另一类为低 Si 埃达克岩 (low\_silica adakites), 为交代地幔部分熔融形成的, 类似于赞岐岩的特征。

### 3 讨论

#### 3.1 赞岐岩的成因

关于赞岐岩的成因尚存在争论。尽管赞岐岩的成分变化较大, 但其富 MgO (Mg<sup>#</sup> > 0.60)、Cr 和 Ni, 表明它是地幔部分熔融形成的 (Stern & Hanson, 1991; Smithies & Champion, 2000; Smithies *et al.*,

2003); 富 LILE 则暗示地幔源区要么受到了消减带的影响, 要么地幔与来自板片的熔体发生了混合作用 (Shirey and Hanson, 1984; Evans and Hanson, 1997; Rapp *et al.*, 1999; Smithies and Champion, 2000)。

晚太古代赞岐岩的现代类似物为日本中新世的赞岐岩, 后者与菲律宾海板块的消减作用有关 (Tatsumi *et al.*, 2003)。Tatsumi (2001) 认为, 消减带沉积物的熔融 (1 050 °C 和 1.0 GPa) 以及随后的熔体-地幔交换作用可以解释高 Mg 安山岩 (赞岐岩) 的成因。实验表明, 赞岐岩可能来自含水条件下的地幔橄榄岩的部分熔融 (Tatsumi and Ishizaka, 1982)。许多人认为, 晚太古代的赞岐岩和高镁安山岩形成在消减带之上的环境 (Stern *et al.*, 1989; Stern and Hanson, 1991), 可能代表了岛弧之下被 TTG 熔体交代的亏损地幔楔部分熔融的产物 (Yogodzinski *et al.*, 1995)。由于赞岐岩的 SiO<sub>2</sub> 含量较高 (相对玄武岩而言), 表明地幔是在相对富水 (流体) 的条件下部分熔融形成的, 通常认为板块消减带之上的地幔楔环境是比较合理的解释, 水来自板块消减带。有人解释晚太古代的赞岐岩是晚或后构造事件的产物 (Stern *et al.*, 1989; Stern and Hanson, 1991; Smithies *et al.*, 2003), 例如, 加拿大苏必利尔的赞岐岩形成于早期的消减事件转变为克拉通最终稳定的晚或后碰撞阶段 (Beakhouse *et al.*, 1999), 而西澳大利亚 Pilbara 克拉通的赞岐岩或许与地幔柱有关, 或许与下地壳的拆沉作用有关 (Smithies and Champion, 1999)。

### 3.2 埃达克岩、TTG 和赞岐岩的关系

埃达克岩、TTG 和赞岐岩相互之间既有联系又有区别 (表 2)。近十几年来, 从埃达克岩到 TTG 到赞岐岩的研究历程显示了深刻的地球动力学含义。

埃达克岩首先是在阿留申新生代岛弧发现的, 它具有富集 LREE、亏损 HREE 和高 Sr 低 Y 和 Yb 的特征, 被认为是年轻的热的消减板片在角闪岩相-榴辉岩相转变带附近形成的 (Defant and Drummond, 1990)。

由于太古宙 TTG 的地球化学特征类似于埃达克岩, 因此, 近几年来, 关于埃达克岩与 TTG 的研究受到广泛的关注, 并形成了两种明显不同的观点: 一种观点强调 TTG 与埃达克岩在地球化学特征上的相似性, 认为太古宙 TTG 也是板块消减时含水的洋壳熔融的 (Drummond and Defant, 1990; Drum-

mond, 1996; Martin, 1999); 另一种观点认为 TTG 不同于埃达克岩, 不是消减的板片熔融的 (Smithies, 2000)。新生代埃达克岩较少出露, 与板块的消减作用有关; 而 TTG 是太古宙不成熟陆壳的主要组成部分。埃达克岩和 TTG 的对比表明, TTG 是贫 Mg 富 Si 和 Na 的, 而产于消减带的埃达克岩是相对富 Mg 贫 Si 的 (表 2), 说明板片熔体与地幔发生过物质交换作用。贫 Mg 富 Si 的 TTG 则可能与板块消减作用没有关系。构造模拟表明, 加厚地壳底部含水玄武质岩石的熔融可能更适合太古宙 TTG 的形成模式 (Smithies, 2000)。

对于 TTG 和埃达克岩成因的争论引发了人们对于太古代陆壳起源的热烈讨论。由于富 Si 贫 Mg 的 TTG 不大可能是消减的板片部分熔融形成的, 因此, 晚太古代具有地幔楔成因特征的赞岐岩就引起了人们广泛的兴趣。虽然目前对于赞岐岩形成的构造环境存在不同的认识, 但是, 赞岐岩可能是在含水条件下富集 LILE 的地幔源岩部分熔融形成的见解得到大多数学者的认可, 这对于探讨太古宙地壳起源具有重要意义 (Shirey and Hanson, 1984; Evans and Hanson, 1997; Rapp *et al.*, 1999; Smithies and Champion, 2000; Smithies *et al.*, 2003)。

### 3.3 赞岐岩的地质意义

赞岐岩以具有较高的 SiO<sub>2</sub> 和 MgO 和/或 Mg<sup>#</sup> 为特征, 是少见的与上地幔橄榄岩平衡的火山岩。现代的赞岐岩很少见, 主要出露在日本新生代的 Setouchi 火山岩带, 说明赞岐岩的形成可能需要特殊的环境, 即年轻的热板片的熔融作用。由于赞岐岩出现在陆壳特定的环境, 因此, 探讨赞岐岩的成因及其形成环境对于理解陆壳形成的机制具有重要的意义。虽然目前人们对太古宙板块构造的性质还了解甚少, 但是, 赞岐岩在太古宙比现代更常见, 暗示太古宙导致板片熔融的消减的岩石圈本身或上地幔可能具有更高的温度。现代陆壳的主要成员是安山质成分的, 而太古宙英安岩和英云闪长岩更常见, 它们可能是由具赞岐岩特征的高镁安山岩分异形成的 (Shimoda *et al.*, 1998)。

TTG 和绿岩带是太古宙陆壳出露最广的两类岩石, 时代从早太古代至晚太古代, 而赞岐岩仅出现在晚太古代陆壳中。由于赞岐岩来自地幔源岩, 表明随着时间的推移, 地幔组分更多地加入到地壳中来。由于 TTG 在化学成分上与新生代板片熔融的埃达克岩有许多相似之处, 使许多人认为 TTG 是板

块消减时由含水的洋壳部分熔融形成的 (Martin, 1999)。实际上 TTG 与赞岐岩存在明显的差异, 例如: TTG 富 Si 和 Na, 而大多数埃达克岩富 Mg 贫 Si, 因此, Smithies (2000) 指出, TTG 很少显示板片熔融的特征, 不同于板片熔融的埃达克岩, 并认为, 早于 3.0 Ga 和超过半数的晚于 3.0 Ga 的 TTG 见不到地幔与消减带熔体存在交换作用的证据, 而晚太古代才存在由地幔直接部分熔融形成的 TTG (如加拿大的 Superior 省)。同时, 他还发现了消减作用和弧-增生的证据。因此, 大多数早太古代和许多晚太古代的 TTG 并不同于新生代的埃达克岩, 它们也不能提供现代型式的消减作用的证据。构造模拟表明, 加厚地壳底部含水玄武质岩石的熔融更适合太古宙 TTG 的形成模式 (Smithies, 2000)。Halla (2005) 对 Fennoscandian Shield 克拉通赞岐岩的 Nd-Pb 同位素研究表明, 该区赞岐岩类可能是深部交代的大陆下岩石圈熔融形成的, 他们认为, 该区大陆下地幔大约是在与大陆形成的同时被交代的, 暗示大陆地幔可能原先形成在岛弧环境, 存在一个被交代的地幔楔。

Smithies 和 Champion (2000) 指出, 2.95 Ga 的 Pilbara 高镁闪长岩 (sanukitoid) 侵入在太古宙西澳大利亚 Pilbara 克拉通的中部, 是晚至后构造期的产物, 有时伴有长英质的碱性岩浆, 通常还与 TTG 相伴或晚于后者。赞岐岩是地幔成因的, 且需要高达 40% 的 TTG 熔体的加入, 这种交代地幔需要一个消减带环境, 而许多太古宙 TTG 却很少有与地幔楔发生过混合的证据。因此, 太古宙 TTG 很可能是玄武质的下地壳部分熔融形成的, 而非消减的板片熔融的。高镁闪长岩套集中在晚太古代时期, 说明消减作用可能仅仅在 3.0 Ga 以后才变得重要起来 (Smithies *et al.*, 2000)。最近的研究发现, 早太古代和晚太古代的 TTG 的化学成分有变化, 这种变化反映了随时间演化地幔楔卷入程度的增加和随地球变冷消减板片角度由浅到陡的变化 (Smithies, 2000; Martin and Moyen, 2002; Martin *et al.*, 2005)。Smithies (2000) 指出, 早中太古代 (3.0~3.8 Ga) 花岗岩的  $Mg^{\#}$  较低 ( $Mg^{\#} < 0.50$ ), 而晚太古代 (2.5~3.0 Ga) 的花岗岩 (包括 TTG) 具有较高的  $Mg^{\#}$  以及更加初始的化学成分特征, 包括较高的 Ni 和 Cr 含量, 逐渐变为赞岐岩类 (sanukitoid)。他们解释这表明地幔对地壳形成的作用只是在 < 3.0 Ga 时才显示出来。Martin 和 Moyen (2002) 考察了 TTG 许多元素 (包括 Ni、Cr 和 Sr) 的变化后也认为, 从早

太古代至晚太古代, 地幔橄榄岩组分的贡献在增加。这种增加, 例如 Ni 和 Cr, 不是渐进的, 而是在 3.0 Ga 时有一个明显的变化。上述特征清楚地表明, 随着时间的演化, 花岗岩形成过程中地幔物质卷入程度也随之增加。Smithies 和 Champion (2000) 指出, 高镁闪长岩集中出现在晚太古代 (< 3.0 Ga), 表明板块消减作用可能在 3.0 Ga 之后才成为一个重要的过程, 晚太古代 LREE 富集的高镁岩套的出现可能标志着现代类型的板块构造的开始。

## 4 结论

(1) 赞岐岩产于日本中新世 (11~14 Ma) Serouchi 火山岩带, 是一种黑色具玻璃质的火山岩, 化学成分以富 Si 质、很高的  $Mg^{\#}$  值 (> 0.6)、较高的 Cr、Ni 含量和 K/Na 值 (0.33~0.52) 为特征, 富集 LILE 和 LREE, 通常具弱的负钨异常, 亏损高场强元素。其形成与菲律宾海板块年轻的热的岩石圈俯冲和四国盆地的张开有关, 产于岛弧的弧前或弧后盆地环境。同位素研究表明, 赞岐岩是地幔成因的, 但有明显的地壳组分的影响, 反映了消减作用的再循环作用。

(2) 赞岐岩与埃达克岩具有大体类似的地球化学特征, 但前者更富 Mg、Cr 和 Ni, 表明赞岐岩可以直接由地幔岩部分熔融形成, 而埃达克岩只能由玄武岩部分熔融形成。埃达克岩由于成因和源区不同, 其地球化学特征可以有比较宽的范围。如果来自板片熔融的埃达克岩熔体与上覆地幔楔发生交换作用, 则贫 Si 和富集 Mg、Cr、Ni, 具有高 Mg 安山岩的特征, 接近贫 Mg 的赞岐岩。

(3) 现代的赞岐岩很少见, 目前仅出露于日本新生代, 说明赞岐岩的形成可能需要特殊的环境。但是, 赞岐岩在太古宙比现代更常见, 暗示太古宙导致板片熔融的消减的岩石圈本身或上地幔可能具有更高的温度。现代陆壳的主要成员是安山质成分的, 而太古宙英安岩和英云闪长岩更常见。研究表明, 早太古代和晚太古代花岗岩的成分是不一样的, 赞岐岩集中出现在晚太古代 (< 3.0 Ga), 表明板块消减作用可能在 3.0 Ga 之后才成为一个重要的过程, 晚太古代赞岐岩的出现可能标志着现代类型板块构造的开始。

## References

Beakhouse G P, Heaman L M and Creaser R A. 1999. Geochemical and

- U-Pb zircon geochronological constraints on the development of a Late Archean greenstone belt at Birch Lake, Superior Province, Canada[J]. *Precambrian Research*, 97: 77~ 97.
- Beyth M, Stern R J, Altherr R, *et al.* 1994. The Late Precambrian Timna igneous complex, Southern Israel: Evidence for comagmatic-type sanukitoid monzodiorite and alkali granite magma[J]. *Lithos*, 31: 103~ 124.
- Crawford A J, Falloon T J and Green D H. 1989. Classification, petrogenesis and tectonic settings of boninites[A]. Crawford A J. Boninite[C]. London: Unwin Hyman, 1~ 49.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662~ 665.
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B13): 21 503~ 21 521.
- Drummond M S, Defant M J and Kepezhinskas P K. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas[J]. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 87: 205~ 215.
- Evans O C and Hanson G N. 1997. Late to post-kinematic Archean boninitoids of the S. W. Superior Province: derivation through direct mantle melting[A]. de Wit M J and Ashwal L D. Greenstone Belts[C]. Oxford: Oxford University Press, 280~ 295.
- Halla J. 2005. Late Archean high Mg granitoids (sanukitoids) in the southern Karelian domain, eastern Finland: Pb and Nd isotopic constraints on crust-mantle interactions[J]. *Lithos*, 79: 161~ 178.
- Hickey R L and Frey F A. 1982. Geochemical characteristics of boninite series volcanics: implications for their source[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46: 2 099~ 2 115.
- Kamei A, Owada M, Nagao T, *et al.* 2004. High Mg diorites derived from sanukitic HMA magmas, Kyushu Island, southwest Japan arc: evidence from clinopyroxene and whole rock compositions [J]. *Lithos*, 75: 359~ 371.
- Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesite: melts from subducted Pacific ocean crust[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4: 117~ 132.
- Kovalenko A V and Savatenkov V M. 2003. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic data on the sanukitoid intrusions of the Karelia, Baltic shield[J]. *European Geophysical Society 2003, Geophysical Research Abstracts*, 5, 01508.
- Martin H and Moyen J F. 2002. Secular changes in TTG composition as markers of the progressive cooling of the earth[J]. *Geology*, 30: 319~ 322.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids[J]. *Lithos*, 46: 411~ 429.
- Martin H. 1994. The Archean grey gneisses and the genesis of the continental crust[A]. Condie K C. Archean Crustal Evolution, Developments in Precambrian Geology 11[C], 205~ 259.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79: 1~ 24.
- Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, *et al.* 1993. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 267 (in Chinese with English abstract).
- Moyen J F, Martin H, Jayananda M, *et al.* 2003. Late Archean granites: a typology based on the Dharwar Craton (India)[J]. *Precambrian Research*, 127: 103~ 123.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, *et al.* 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 160: 335~ 356.
- Rogers G, Saunders A D, Terrell D J, *et al.* 1985. Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja California, Mexico[J]. *Nature*, 315: 389~ 392.
- Rollison H and Martin H. 2005. Geodynamic controls on adakite, TTG and sanukitoid genesis: implications for models of crust formation-Introduction to the Special Issue[J]. *Lithos*, 79: ix~ xii.
- Saunders A D, Rogers G, Marriner G F, *et al.* 1987. Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Baja California, Mexico: implications for the petrogenesis of post-subduction magmas[J]. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 32: 223~ 245.
- Shimoda G, Tatsumi Y, Nohda S, *et al.* 1998. Setouchi high Mg andesites revisited; geochemical evidence for melting of subducting sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 479~ 492.
- Shirey S B and Hanson G N. 1984. Mantle-derived Archean monzodiorites and trachyandesites[J]. *Nature*, 310: 222~ 224.
- Smithies R H. 2000. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 182: 115~ 125.
- Smithies R H and Champion D C. 1999. Archean high Mg diorite (sanukitoid) suite, Pilbara Craton, Western Australia[A]. *Barbarin B. The Origin of Granites and Related Rocks: Fourth Hutton Symposium Abstracts, September 1999 [C]*. Clermont-Ferrand, France, 190.
- Smithies R H and Champion D C. 2000. The Archean High Mg Diorite Suite: Links to Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite Magmatism and Implications for Early Archean Crustal Growth[J]. *Journal of Petrology*, 41: 1 653~ 1 671.
- Smithies R H, Champion D C and Cassidy K F. 2003. Formation of Earth's early Archean continental crust [J]. *Precambrian Research*, 127: 89~ 101.
- Stern C R and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 263~ 281.
- Stern R A, Hanson G N and Shirey S B. 1989. Petrogenesis of mantle-derived, LILE-enriched Archean monzodiorites and trachyandesites (sanukitoids) in Southwestern Superior Province[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 26: 1 688~ 1 712.
- Stern R and Hanson G. 1991. Archean high Mg granodiorites: a deriva-



- tive of light rare earth element enriched monzodiorite of mantle origin[J]. *J. Petrol.*, 32: 201~ 238.
- Stevenson R, Henry P and Garipey C. 1999. Assimilation-fractional crystallization origin of Archean sanukitoid suites; western Superior Province, Canada[J]. *Precambrian Research*, 96: 83~ 99.
- Tatsumi Y. 1982. Origin of high-magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan: II. Melting phase relations at high pressures[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 60: 305~ 317.
- Tatsumi Y. 2001. Geochemical modeling of partial melting of subducting sediments and subsequent melt-mantle interaction; generation of high-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, Southwest Japan [J]. *Geology*, 29: 323~ 326.
- Tatsumi Y and Ishizaka K. 1982. Origin of high-magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan, I. Petrographical and chemical characteristics[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 60: 293~ 304.
- Tatsumi Y, Shukuno H, Sato K, *et al.* 2003. The petrology and geochemistry of high-magnesium andesites at the western tip of the Setouchi volcanic belt, SW Japan[J]. *Journal of Petrology*, 44: 1 561 ~ 1 578.
- Tsuchiya N, Suzuki S, Kimura J I, *et al.* 2005. Evidence for slab melt/mantle reaction: petrogenesis of Early Cretaceous and Eocene high-Mg andesites from the Kitakami Mountains, Japan[J]. *Lithos*, 79: 179~ 206.
- Wu Xiangyang, Xu Yigang, Ma Jinlong, *et al.* 2002. Geochemistry and petrogenesis of the Mesozoic high-Mg diorites from western Shangdong[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 27: 228~ 236 (in Chinese with English abstract).
- Yogodzinski G M, Volynets O N, Koloskov A V, *et al.* 1994. Magnesian andesites and the subduction component in a strongly calc-alkaline series at Piip Volcano, far western Aleutians[J]. *J. Petrol.*, 35: 163~ 204.
- Yogodzinski GM, Kay RW, Volynets ON, *et al.* 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107: 505~ 519.
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2004. Sanukite of Late Archean and Early Earth evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1 355~ 1 362(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 267.
- 巫祥阳, 徐义刚, 马金龙, 等. 2002. 鲁西中生代高镁闪长岩的地球化学特征及其成因探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 27: 228~ 236.
- 张 旗, 王 焰, 钱 青, 等. 2004. 晚太古代 Sanukite(赞岐岩)与地球早期演化[J]. *岩石学报*, 20(6): 1 355~ 1 362.

#### • 简讯 •

## 《岩石矿物学杂志》发表论文荣获第二届 中国科协期刊优秀学术论文奖

第二届中国科协期刊优秀学术论文奖评选于 2005 年 1 月正式揭晓,《岩石矿物学杂志》1999 年第 2 期发表的作者为邱检生、王德滋、周金城的论文《福建永泰云山晚中生代双峰式火山岩的地球化学及岩石成因》荣获第二届中国科协期刊优秀学术论文奖。本届参加评选的论文发表时限为 1999 年 1 月至 2003 年 12 月,先由中国科协所属全国性学会、协会、研究会主办的学术期刊编辑部推荐,后经 3 名同行专家个人推荐,再由刊物的主办学会组织专家初审后推荐,经中国科协期刊优秀学术论文专家评审委员会评选,报中国科协学术交流工作委员会审定并在网上公示后才得以产生。本届获奖优秀学术论文共 99 篇,其中中国地质学会主办刊物获奖论文 2 篇。

获此殊荣,无论对论文作者还是对我刊编辑部,都将会起到激励的作用。我刊将会继续努力,真诚为作者、读者服务,争取将刊物办得更好。

《岩石矿物学杂志》编辑部

2005- 02- 05