

北秦岭老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩及构造环境 ——一种可能的造山带型环斑花岗岩*

王晓霞^{1,2} 王涛³ 卢欣祥⁴ 肖庆辉⁵

WANG XiaoXia^{1,2}, WANG Tao³, LU XinXiang⁴ and XIAO QingHui⁵

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054
 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
 4. 河南地质科学研究所, 郑州 450053
 5. 国土资源部信息研究院, 北京 100037
1. School of Earth Science and Resource, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. School of Earth Science and Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
4. Henan Institute of Geology Research, Zhengzhou 450053, China;
5. China information Center of Land and Resource, The Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China
- 2003-02-22 收稿, 2003-07-02 改回。

Wang XX, Wang T, Lu XX, Xiao QH. 2003. Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids in North Qinling and their tectonic setting: A possible orogenic-type rapakivi granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 650–660

Abstract The Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids occur along the north side of the Shangdan suture in Qinling orogenic belt. Their texture is characterized by rapakivi texture, showing ovoid alkali feldspar megacrystal surrounded by one or occasionally, two plagioclase mantles. Some of them remain unmantled. This texture is different from that of euhedral alkali feldspar mantled by plagioclase. Geochemically, they show transition features from I to A type granites. Integration analysis of their geochemistry, passive-emplacement structural pattern and regional tectonic setting suggests that the plutons were emplaced in post-orogenic or post-collision setting. All those characteristics show both similarities and differences compared with typical Proterozoic non-orogenic rapakivi granites, and are similar to some rapakivi granitoids in the orogenic belt in Brazil. Therefore, this paper suggests that they are not common porphyritic granitoids, but rapakivi-textured granitoids, and could be a kind of orogenic-type rapakivi granites, i. e., untypical rapakivi granites, which occur in orogenic belt.

Key words Rapakivi texture, I to A type granite, Post-collision, Qinling orogenic belt

摘要 老君山和秦岭梁岩体产于秦岭造山带商丹缝合带北侧,其岩石普遍发育环斑结构,表现为碱性长石巨晶多为卵球状,有些发育斜长石外壳,有些不发育。这不同于一般花岗岩局部出现的具斜长石外壳自形碱性长石巨晶结构。在地球化学上,该岩石显示 I-A 型花岗岩过渡特点。区域背景、构造被动定位特点和地球化学综合分析表明,它们可能定位于后碰撞或后造山环境。这些特征与典型的元古代克拉通非造山环境中的环斑花岗岩既有相似之处,也有一定差异,而与巴西造山带中环斑花岗岩较为相似。本文认为,它们不是一般的斑状花岗岩,而是最近注意研究的环斑结构花岗岩,有可能是一种造山带型环斑花岗岩,即产于造山带中的非典型环斑花岗岩。

关键词 环斑结构; I-A 过渡型花岗岩; 后碰撞; 秦岭

中图法分类号 P588.121

环斑花岗岩(rapakivi granite)是以发育环斑结构为特征的一类特殊类型的花岗质岩石。典型的环斑花岗岩多出现在元古代,产于稳定大陆的非造山环境(Rämö and Haapala, 1995; Haapala and Rämö, 1999)。因此,长期以来,元古代、非造山一直被认为是环斑花岗岩的基本特征。但近年来,有关

研究取得了一些新的进展(王晓霞等, 2001),表明环斑花岗岩可以产于各个地质时期,并可以发育于造山带;另外,还注意和提出了一种环斑结构花岗岩(rapakivi-textured granites)或环斑状花岗岩(rapakivi-like granite)(如 Vinogradov and Vinogradova, 1991; Haapala *et al.*, 1995; Luttinen and

* 国家自然科学基金(40072065)、中国地质调查局“中国花岗岩重大地质问题研究”(200113900018)和西北大学大陆动力学教育部重点实验室资助项目。

第一作者简介: 王晓霞,女,1960年生,博士,副教授,岩石学专业, E-mail: xiaoxiawang@hotmail.com 或 taowang@pku.edu.cn

Siivola, 1996), 即与典型环斑花岗岩在岩石类型、矿物组成和成分以及地球化学等方面有差异的具有环斑结构的花岗岩质岩石。目前, 这方面还没有成熟的研究(多见于国际会议论文摘要, 如 Haapala *et al.*, 1995; Luttinen and Siivola, 1996)。它们如何定义、怎样与典型的环斑花岗岩区别? 揭示的构造意义是什么? 还不十分清楚, 需要深入研究。

秦岭造山带也报道有类似的环斑结构花岗岩, 并且成带分布, 时代为中生代(如 Lu *et al.*, 1996; 1998; 1999; 张宗清等, 1999)。这引起了人们的关注, 同时, 也产生了争议(赵太平, 2001; 张静等, 2002; 卢欣祥等, 2003)。最近, 有文章认为秦岭梁花岗岩体不是环斑花岗岩, 而是一般的“石英二长斑岩”(张静等, 2002)。另外, 有迹象显示, 中国还有不少地区发育有类似的花岗岩。显然, 对这类岩石如何认识, 怎样鉴别环斑花岗岩、环斑结构花岗岩和一般的斑状花岗岩? 这已经成为一个需要认真研究和探讨的问题。

本文对老君山、秦岭梁花岗岩进行了研究, 结果表明它们发育环斑结构, 属于环斑结构花岗岩, 可能是一种非典型环斑花岗岩。

1 岩体产出的地质背景及基本特征

秦岭造山带由 3 个块体、两个构造带即缝合带构成

(Meng and Zhang, 1999; 张国伟等, 2001)。3 个块体由北往南依次是: 华北地块(包括北秦岭造山带)、秦岭微板块(原南秦岭)和扬子地块; 它们分别为北秦岭的商丹缝合带和南秦岭的勉略缝合带所分割(图 1)。华北板块和秦岭微板块沿北秦岭商丹带在古生代碰撞, 奠定了北秦岭造山带; 秦岭微板块与扬子板块沿勉略带在中生代碰撞, 形成了南秦岭造山带(Meng and Zhang, 1999; 张国伟等, 2001)。

秦岭环斑结构花岗岩带沿北秦岭商丹主缝合带两侧展布(图 1), 主要有沙河湾、老君山、秦岭梁和朱厂沟等岩体, 它们是秦岭中生代花岗岩(Sun *et al.*, 2002)的一部分。其中, 老君山、秦岭梁环斑结构花岗岩体分布于北秦岭商丹带北侧, 侵位于中生代宝鸡巨型复式岩体的东端, 可能为该复式岩体的组成部分, 已分别测得锆石 U-Pb 年龄 214 ± 3 Ma 和 217 ± 3 Ma(卢欣祥等, 1999), 与宝鸡岩体主体岩石已有的年龄(213Ma, 锆石 U-Pb, 卢欣祥等, 2000)相近。

这两个环斑结构花岗岩体近于椭圆形, 面积总计约 180 km²。在南部, 它们侵入于秦岭群, 与围岩侵入接触清楚。该岩体岩石类型主要是似斑状黑云角闪石英二长岩; 在局部, 特别是在包体较发育的地段, 岩性不均一, 可见黑云角闪石英正长岩, 碱性长石巨晶含量达 50%~60%。另外, 在宝鸡复式岩体的中部还发育有碱性花岗岩(206Ma, U-Pb, 卢欣祥等, 2000)(图 1)。

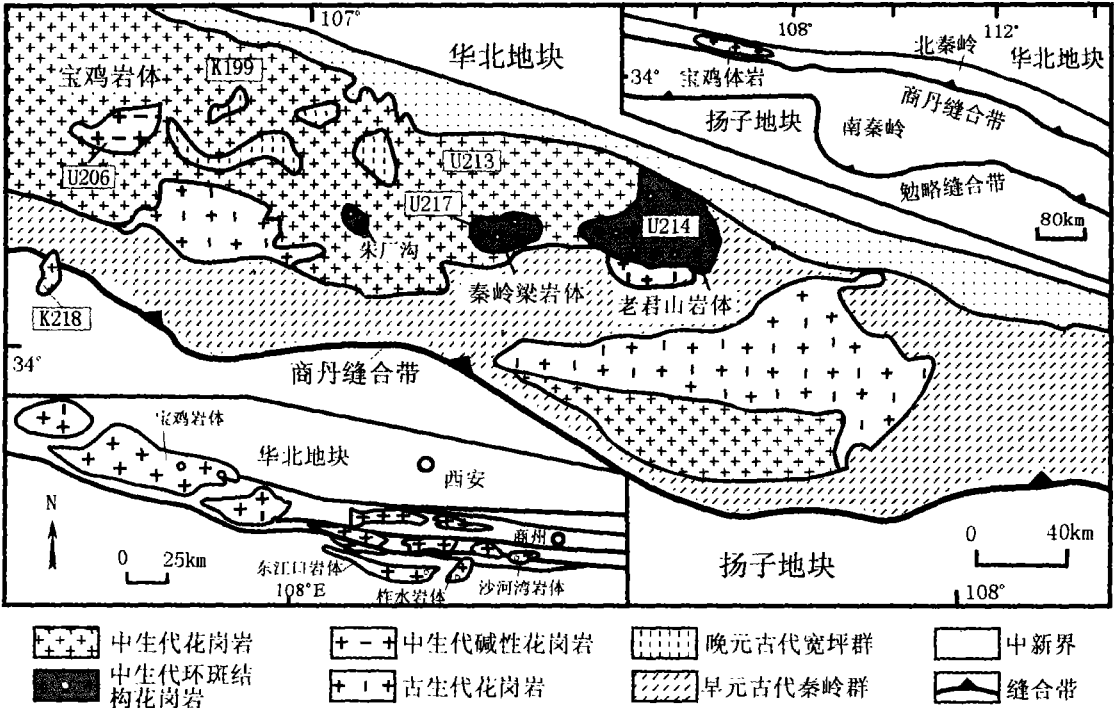


图 1 老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩体地质简图及其构造背景
方框内为同位素数据, K 为 K-Ar 年龄, U 为 U-Pb 年龄(据卢欣祥等, 2000)

Fig. 1 Geological sketch map and tectonic setting of the Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoid plutons

2 岩石结构——环斑结构

岩石结构的研究无疑是确定和讨论这类花岗岩是一般花岗岩还是环斑结构花岗岩的基础。本研究显示,环斑结构是秦岭梁和老君山岩体普遍发育的特征结构,以发育卵球状、球状碱性长石巨晶和环斑长石为特点。碱性长石巨晶发育程度不很均匀,含量一般 15% ~ 30%,局部达 50% ~ 60%。它们绝大多数呈卵球状和球状,几乎占长石巨晶的 60% ~ 80% (图 2-a,b,c)。其中,有大约 25% ~ 50% 的碱性长石巨晶发育斜长石外壳,而且主要呈卵球状 (图 2-a,b)。

此外,少数长石巨晶 (占长石巨晶的 40% ~ 20%) 为半自形,粒度较小。

环斑长石由卵球状碱性长石内核和灰白色的斜长石外壳组成 (图 2-a,b,c)。碱性长石内核多为卵球状,直径多为 1 ~ 2cm 左右,均为单晶,具卡氏双晶,发育条纹结构。斜长石外壳较薄,一般为 2mm 左右厚。有些斜长石外壳是由单颗粒斜长石构成 (图 2-d),也有的是由方位不同的斜长石小颗粒集合体组成。斜长石均发育钠长石双晶, $An = 16 \sim 23$ 。从我们的电子探针分析资料看,从碱性长石巨晶核部到边部,Or 的含量在减少,Ab 的含量在增加 (王晓霞, 2003)。有些环斑长石发育多层斜长石外壳。

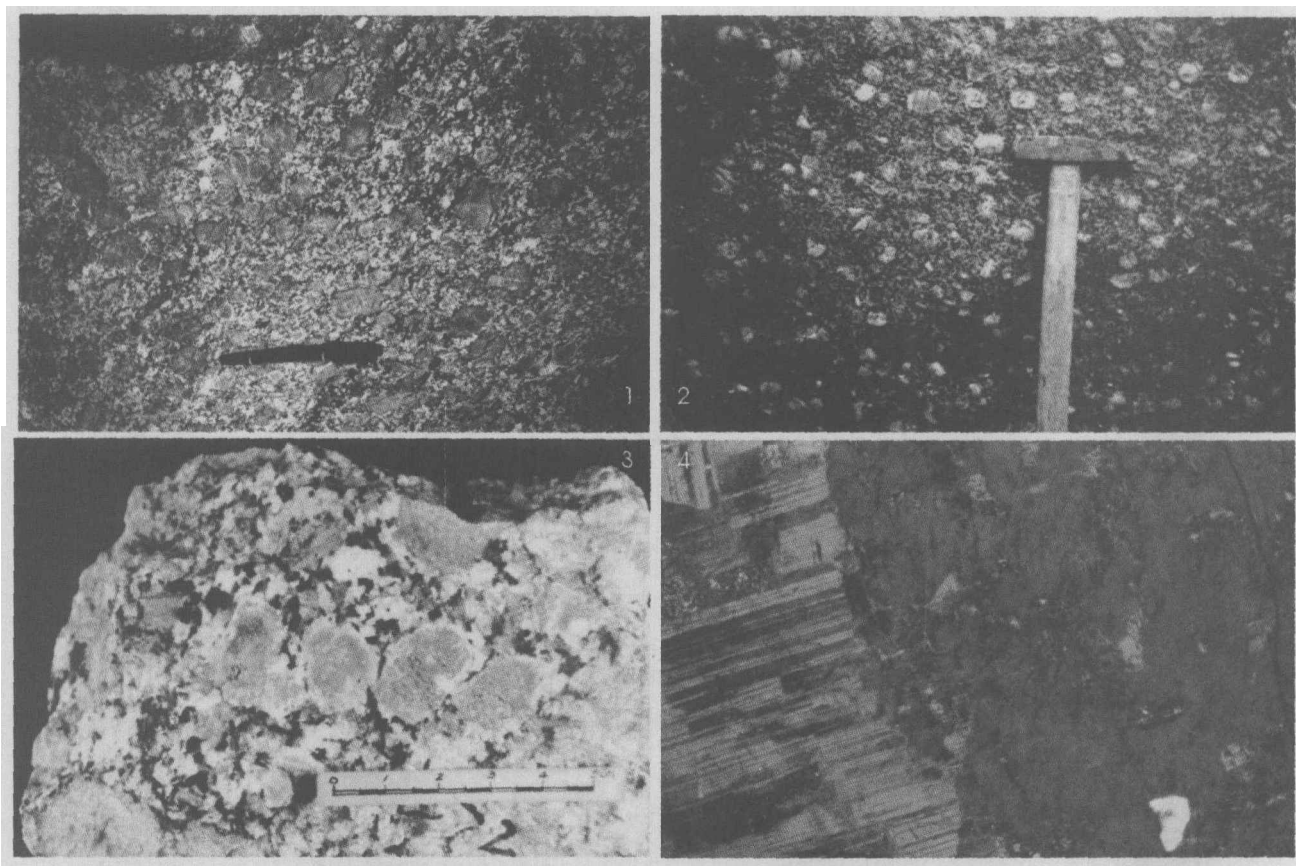


图 2 秦岭梁和老君山花岗岩的环斑结构特征

- 秦岭梁岩体环斑结构在野外露头上的特征。环斑长石由碱性长石内核和斜长石外壳组成。内核碱性长石主要呈卵球状,粒径主要为 1 ~ 2cm;外壳斜长石宽 1 ~ 2mm。粒径较小的环斑长石也以球状为主,斜长石外壳更发育。有些碱性长石巨晶不发育斜长石外壳,但其形态仍为卵球状,这也是环斑结构的一种特征。
- 老君山岩体环斑结构在稍风化的露头上的特征。环斑长石 (核部为碱性长石) 的 (卵) 球状形态更加明显,斜长石外壳也清晰可见。在风化较明显的露头可见环斑长石呈球状脱落。这是环斑结构 (rapakivi texture) 原始定义中所描述的典型特征,与芬兰典型的元古代 Wiborg 环斑花岗岩结构相似。
- 秦岭梁岩体环斑结构在手标本上的特征。环斑长石 (核部为碱性长石) 主要为卵球状,而且发育斜长石外壳。内核和外壳均具有斜长石、石英、黑云母和角闪石等细粒矿物包裹体。这些也是环斑结构的特征。
- 环斑结构的微观特征。碱性长石内核中有细粒石英、斜长石和暗色矿物等包裹体。斜长石外壳为一个斜长石颗粒,发育钠长石双晶。核与壳界线较平滑,说明它们是岩浆作用的产物,而不是交代成因。正交偏光,长径 4.3mm。

Fig. 2 Characteristics of rapakivi texture of the Qinlingliang and Laojunshan granitoids

在碱性长石内核和斜长石外壳中均有角闪石、黑云母、斜长石和石英等矿物包裹体(图 2-c,d)。从碱性长石内核到斜长石外壳,包裹体的数量增加,有时可见这些包裹体呈同心圆状分布。斜长石包裹体为自形,多数发育一个干净的钠长石镶边。石英包裹体以不规则状和水滴状两种形式出现。黑云母和角闪石包裹体呈自形-半自形,粒度一般小于 0.1mm。

环斑结构的基质为中粒半自形粒状结构,主要由碱性长石(10%~15%)、石英(15%~20%)、斜长石(30%~35%)、黑云母(6%左右)和角闪石(7%~10%)等组成。碱性长石为它形,具条纹结构,但其条纹没有巨晶中碱性长石发育,可见纺锤状格子双晶,常充填于其它矿物间隙中。斜长石为半自形,发育钠长石双晶和卡钠复合双晶,具环带结构($An=21\sim23$)。在两种长石的接触处,可见蠕虫结构。角闪石为绿色的普通角闪石,半自形。黑云母为褐色的黑云母,具绿泥石化。据我们和前人(张静等,2002)的电子探针分析,角闪石、黑云母具有富镁贫铁的特点,与沙河湾环斑结构花岗岩的角闪石和黑云母(王晓霞等,1998;王晓霞等,2003)相似。石英呈它形,充填在其它矿物之间,分布不均匀,有时呈团块出现。

上述特征特别是卵球状长石巨晶显示了典型环斑结构的特点(Vorma, 1976; Rämö and Haapala, 1995),其中,半自形的环斑长石在一般环斑花岗岩中也是存在的(Stimac and Wark, 1992; Rämö and Haapala, 1995),如芬兰的 Jaala-litti 岩体(Salonsaari, 1995)。

3 A-I 型花岗岩过渡的地球化学特征

两岩体代表性样品的岩石化学分析是在赫尔辛基大学地质系采用 ICP-AES 完成;微量元素和稀土元素在中国科学院地质与地球物理所 JICA 实验室采用 ICP-MS 完成。分析结果列于表 1。

它们的岩石化学具有以下特点:(1) SiO_2 含量较低(64%~65%),低于一般典型的环斑花岗岩(Rämö and Haapala, 1995; 1996)。 $A/CNK=0.72\sim0.95$, 均为准铝型(图 3-a),与一般 I 型花岗岩和典型环斑花岗岩相同;(2) K_2O/Na_2O 为 0.85~1.02 (除一个样品为 0.48 外),稍低于 A 型花岗岩和典型的环斑花岗岩(K_2O/Na_2O 多大于 1, Rämö and Haapala, 1995; 1996),但 K_2O+Na_2O 含量较高,为 6.8%~8.5%,与典型的环斑花岗岩相似;(3) $FeO/(FeO+MgO)$ 变化于 0.5~0.65 之间,低于典型环斑花岗岩(0.79~1.00)(Rämö and Haapala, 1995; 1996),显示相对富镁贫铁特征。

在花岗岩成因类型图解中,分析样品位于 I & S 和 A 型花岗岩边界附近,偏于 A 型区域(如图 3-b,c),显示出了过渡性花岗岩特征。但由于该岩石的矿物组成(含角闪石、副矿物主要为磁铁矿、榍石)和地球化学特征表明它们不可能

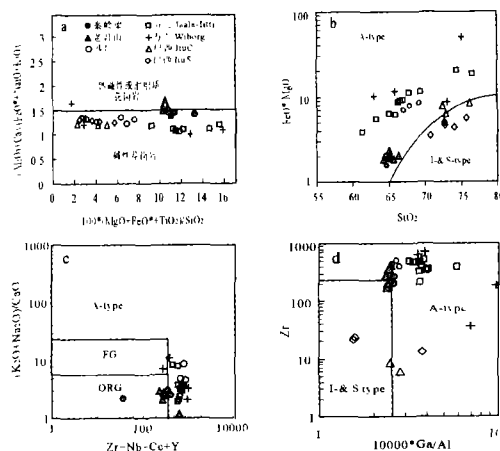


图 3 老君山和秦岭梁岩体的岩石成因类型判别

a. $(Al_2O_3 + CaO)/(FeO^* + Na_2O + K_2O) - 100(MgO + FeO^* + TiO_2)/SiO_2$ 图解(据 Sylvester, 1989); b. $FeO^*/MgO - SiO_2$ 图解(据 Eby, 1992); c. $(K_2O + Na_2O)/CaO - (Zr + Nb + Ce + Y)$ 图解(据 Whalen, 1987); d. $Zr - 10000 * Ga/Al$ 相关图(据 Whalen, 1987)。沙厂岩体的资料据郁建华等(1996); 芬兰 Jaala-Litti 和 Wiborg 岩体据 Salonsaari(1995); 巴西 Itue 和 Itus 岩体的据 Wernick *et al.* (1997)

Fig. 3 Discrimination diagrams of rock type for the Laojunshan and Qinlingling plutons

a. Diagram of $(Al_2O_3 + CaO)/(FeO^* + Na_2O + K_2O) - 100(MgO + FeO^* + TiO_2)/SiO_2$; b. Diagram of $FeO^*/MgO - SiO_2$; c. Diagram of $(K_2O + Na_2O)/CaO - (Zr + Nb + Ce + Y)$; d. Diagram of $Zr - 10000 * Ga/Al$

是 S 型花岗岩,因此,它们应为 I-A 型过渡的花岗岩。

在微量元素上(表 1),老君山和秦岭梁岩体的 Th、Ta、La、Ce、Nd、Zr、Hf 相对略富集,Nb、P、Ti 弱亏损(图 4),与一般的岛弧花岗岩相似,但 Nb、P、Ti 的亏损程度比岛弧花岗岩的低;它们的强不相容元素与板内花岗岩(Pearce *et al.*, 1984)相似(图 5),弱不相容元素与后碰撞花岗岩的(Pearce *et al.*, 1984)相似(图 5);与典型环斑花岗岩相比,其 Rb、Nb、Ta、F、Ga、Zr 稍低,而 Sr 稍高。因此,在有关图解中,位于 A 型和 I&S 型花岗岩的边界附近,并偏向于 A 型区域(如图 3-c,d)。

两个岩体的稀土配分型式完全一致(图 6),说明有相同的成因。总体来看,其 ΣREE 较低,LREE 富集,轻重稀土分馏较明显;LREE/HREE 比值或 $(La/Yb)_N$ 比值较大;几乎没有铕异常($Eu/Eu^* = 0.8\sim0.9$),表明岩石中的斜长石较富集,不同于典型环斑花岗岩和 A 型花岗岩。

可见,在地球化学上,老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩显示有 A-I 花岗岩的过渡特点,并在有些特征上更偏向于 A 型,在一些图解中与世界上一些环斑花岗岩在同一区域(图 3-a,b,c,d)。另外,在暗色矿物成分上,它们与巴西造山带环斑花岗岩(Wernick *et al.*, 1997)及一些 I-A 复式花岗岩岩体(如漳州岩体,周珣若和吴克隆,1994)相似,显示了富镁贫铁特征。

表1 秦岭梁和老君山岩体岩石化学、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Major (%), trace ($\mu\text{g/g}$) and rare earth ($\mu\text{g/g}$) element compositions of the Qinlingliang and Laojunshan plutons

岩体 岩性 样号	秦岭梁			老君山				石英二长岩的基质
	黑云角闪石英二长岩			黑云角闪石英二长岩				
	Q1	QS2	QS2 - 1	LS	LS1	LS2	LS3	
SiO ₂	64.65	64.80	65.00	66.28	65.00	65.00	65.00	50.00
TiO ₂	0.63	0.85	0.80	0.55	1.65	0.68	1.00	1.80
Al ₂ O ₃	14.29	15.15	14.50	14.93	15.20	15.85	14.50	15.30
Fe ₂ O ₃	1.70	4.20	4.10	1.72	3.60	4.00	4.15	10.00
FeO	3.02			2.48				
MnO	0.08	0.25	0.25	0.07	0.45	0.24	0.25	0.47
MgO	3.07	2.16	2.17	2.03	1.60	2.00	2.00	7.20
CaO	3.66	3.23	3.34	3.29	3.55	3.20	3.00	6.30
Na ₂ O	4.05	4.20	4.20	4.34	5.00	4.00	4.15	4.40
K ₂ O	3.93	4.32	4.05	3.70	2.40	4.00	4.18	2.40
P ₂ O ₅	0.28	0.30	0.30		0.65	0.30	0.97	0.65
H ₂ O ⁺	0.49			0.48				
L. O. I	0.69	0.32	1.05	0.46	0.72	0.47	0.90	0.97
总量	100.54	99.78	99.76	100.33	99.82	99.74	100.10	99.49
A/NKC	0.81	0.87	0.84	0.87	0.88	0.95	0.86	0.72
δ	2.94	3.33	3.09	2.78	2.49	2.91	3.15	6.61
F		865.00	795.00		1955.00	840.00	1800.00	2145.00
Cr		74.52	65.66	200.00	36.71	40.28	85.20	125.76
Ni		35.69	32.94	32.00	20.25	22.83	40.48	72.16
V		74.39	73.36	89.00	55.43	60.97	60.23	125.97
Ba		1252.41	1224.01	890.00	571.05	1341.52	1480.17	297.52
Ga		20.63	20.39	6.80	18.99	20.45	19.10	27.43
Sr		617.29	588.19	770.00	594.26	564.33	693.37	457.78
Rb		130.11	89.07	91.00	77.42	129.93	118.65	92.60
Nb		22.97	21.96		18.47	26.68	19.17	18.12
Zr		275.97	205.96	156.00	163.45	179.76	193.80	408.25
Hf		7.18	5.41		4.53	4.90	5.44	10.64
Th		20.10	17.04	28.00	15.39	31.01	15.28	19.94
Ta		2.09	1.94		1.67	2.52	1.77	1.21
La	23.10	47.42	43.91	60.92	45.80	49.78	40.66	100.01
Ce	35.10	89.27	83.72	128.77	81.40	101.86	74.38	189.78
Pr		9.45	9.03	15.36	8.65	11.22	7.89	22.11
Nd	20.10	31.98	30.23	49.52	28.79	37.54	26.43	75.23
Sm	3.29	5.22	4.90	9.09	4.49	5.92	4.24	12.17
Eu	0.27	1.57	1.49	2.15	1.28	1.63	1.50	2.55
Gd		4.74	4.53	6.78	4.10	5.51	3.97	11.55
Tb	0.49	0.60	0.59	1.11	0.53	0.73	0.52	1.55
Dy		3.23	3.12	5.14	2.85	3.95	2.76	8.08
Ho	1.41	0.65	0.61	0.97	0.56	0.80	0.54	1.63
Er		1.85	1.77	1.98	1.65	2.38	1.61	4.78
Tm		0.26	0.26	0.17	0.25	0.33	0.23	0.72
Yb	2.15	1.83	1.75	2.22	1.59	2.28	1.49	4.39
Lu	0.47	0.27	0.25	0.32	0.24	0.32	0.22	0.62
Y		18.26	17.32	25.87	15.74	22.30	15.00	41.13
(La/Yb) _N	7.26	17.52	16.98	18.54	19.44	14.77	18.40	15.39
δEu		0.95	0.95	0.80	0.90	0.86	1.10	0.64

Q1 和 Ls 引自严阵(1985)

这种地球化学特征表明,它们虽然不具有典型的 A 型花岗岩特征,但也不具有一般的 I 型花岗岩特点,而显示了两者的过渡。这可能正是非典型环斑花岗岩的一种特点。

4 环斑结构花岗岩形成的构造环境

花岗岩构造环境的判别不能仅仅依据自身地球化学特征,重要的是还需要岩体构造和地质背景多方面的综合研究。以下通过这 3 个方面的分析来探讨老君山、秦岭梁等环斑结构花岗岩体形成的构造环境。

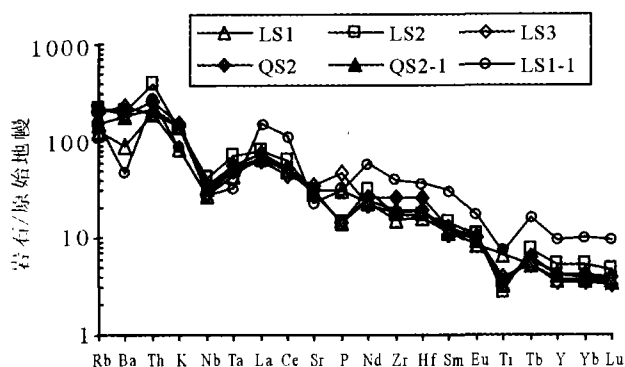


图4 老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩蜘蛛网图
(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Primitive mantle-normalized multi-element spidergram for the Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids

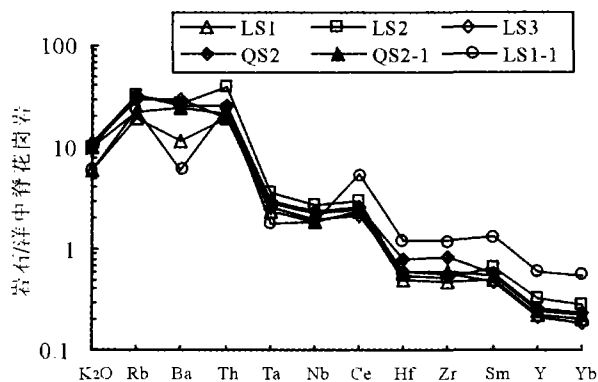


图5 秦岭粮梁和老君山环斑结构花岗岩的洋中脊花岗岩(ORG)归一化图
(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 5 ORG-normalized multi-element spidergram for the Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids

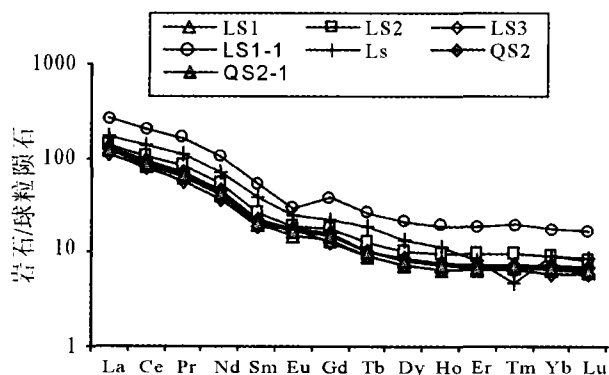


图6 老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩稀土配分图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for the Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids

4.1 岩石地球化学证据

由上可见,在主量元素上,该花岗岩富碱,贫硅、铁,所以在主量元素的构造环境判别图解中位于后碰撞和后造山的界限一带(图 7-a)。在微量元素上,其 Rb 和 Ta 的含量明显低于同碰撞花岗岩,故不具有同碰撞花岗岩的特点,而接近于火山弧或板内环境花岗岩。但 Y、Nb 含量又略高于岛弧花岗岩,而接近于板内环境。因此,在构造判别图中,它们与 A 型环斑花岗岩一起位于后碰撞区域(图 7-b),从而显示了后碰撞的特点。另外,整个秦岭造山带中生代花岗岩形成时间较短(220~205Ma 如, Sun *et al.*, 2002),而且岩石类型多样(具有 S、I、A 型花岗岩)。这也是后碰撞花岗岩的特点。

更重要的是,它们与同一构造带中(北秦岭商丹带)的古生代同造山(俯冲-碰撞)挤压背景下形成的花岗岩(如灰池子等)(李伍平等, 2001)明显不同(如图 7-b),说明环斑结构花岗岩不具有该区俯冲-碰撞挤压背景的花岗岩特点。如果说这种单一的判别图解不很确切的话;那么,通过这种产于同一地质背景下的不同时代花岗岩的对比得出的结论应该相对可靠。另外,在宝鸡复式岩体中发育有时代相近并略晚的碱性花岗岩(206 Ma, U-Pb, 卢欣祥等, 2000),也进一步证实这种相对拉张的后碰撞环境,至少说明在环斑结构花岗岩侵位时正处于后碰撞从挤压向伸展转折过程。

4.2 岩体构造型式证据

老君山、秦岭梁岩体以及整个宝鸡复式岩体等的形态不规则(图 1)。岩体几乎不显示岩浆面理和变形面理,包体也没有明显的定向,故没有边强中弱的主动侵位的应变型式。而且岩体清楚地切割了秦岭群围岩片麻理,并没有造成明显的变形弯曲,即不发育围岩接触变质变形带。所有这些特点明显不同于主动侵位的岩体构造型式,而显示了一种相对拉张环境下的岩体被动定位的构造型式。

通过与该区同一构造带和同一地层(秦岭群)中在挤压环境下主动侵位的花岗岩体进行对比,无疑更具有说服力。在秦岭群中有大量主动侵位岩体,其中最大的灰池子岩体最为典型(Wang *et al.*, 2000),其包体和面理显示了边强中弱的应变型式,围岩发育 1~2km 的接触变质变形带,显示相对挤压环境下主动侵位的特点;而老君山、秦岭梁岩体的构造型式显然与此大相径庭。这进一步说明,老君山、秦岭梁岩体可能定位于相对拉张的构造环境。

更重要的是,与该岩体同期、同成因的沙湾环斑结构花岗岩、柞水岩体均切割了商丹带,包括韧性带和脆性带,而且,并没有被错动的迹象(图 1)。这清楚地表明,这些中生代花岗岩体侵位于商丹带主期变形之后,而且,再没有遭受明显的构造变动,也显示了一种后构造的特点。

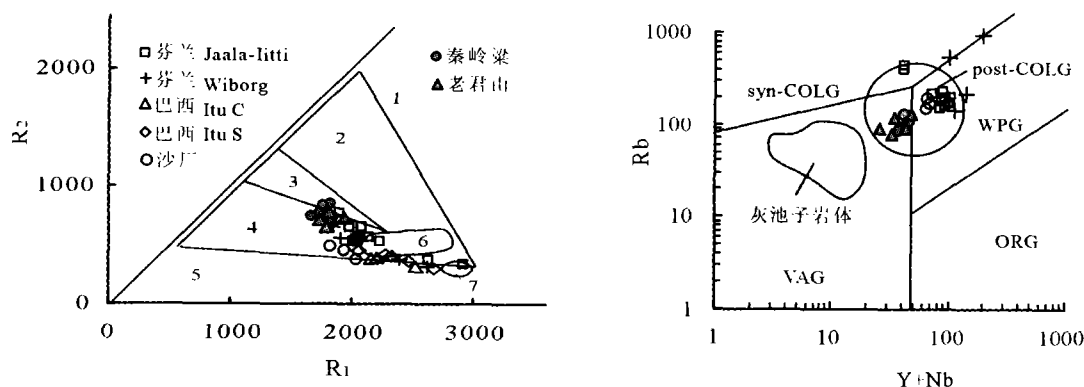


图7 老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩构造环境判别图解

a. $R_1 - R_2$ 相关图(据 Batchlor and Bowden, 1985): 1-幔源花岗岩; 2-板块碰撞前消减地区花岗岩; 3-板块碰撞后隆起花岗岩; 4-晚造山期花岗岩; 5-非造山区花岗岩; 6-地壳熔融的花岗岩; 7-造山后期 A 型花岗岩。

$R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$, $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$

b. $Rb - Y + Nb$ 相关图(据 Pearce *et al.*, 1984): syn-COLG-同碰撞; post-COLG-后碰撞; VAG-岛弧; ORG-洋脊花岗岩; WPG-板内; 灰池子岩体样品分布区域(据李伍平等, 2001)

Fig. 7 Discrimination diagrams of tectonic setting for the Laojunshan and Qinlingliang plutons

a. Diagrams of $R_1 - R_2$; b. Diagrams of $Rb - Y + Nb$

4.3 地质背景的印证

对秦岭造山带主造山期虽然有不同认识,但是,现在越来越多的研究表明,秦岭造山带经历了3个块体、沿两个带的多期次碰撞(如 Zhang G W *et al.*, 1995; 1996; 张国伟等, 2001)或由北向南的递进俯冲增生(如 Raschbucie *et al.*, 2003)。无论何种模式,所有研究几乎一致显示,沿北秦岭商丹带的俯冲-碰撞主要发生于古生代(362Ma 左右),形成了北秦岭造山带;而沿南秦岭勉略带、大别山的碰撞主要在中生代,形成了南秦岭造山带,并最终完成了扬子与华北地块的全面碰撞(Zhang H F *et al.*, 1997; Xue, 1996; Lerch *et al.*, 1995; Li and Sun, 1996; Mattauer *et al.*, 1985; Zhang G W *et al.*, 1995; 1996; 张国伟等, 2001; Raschbucie *et al.*, 2003)。而老君山、秦岭梁岩体分布于北秦岭商丹带,而且在其北侧(更远离秦岭南缘的勉略带)(图1)。因此,应优先考虑它与北秦岭碰撞造山作用的关系。如果这样考虑,这些岩体(214~217Ma)显然是碰撞之后(after collisional)或后造山(post orogenic)岩体。

由于秦岭环斑结构花岗岩与秦岭中生代花岗岩具有密切的时空关系,故很容易将它们一起与中生代碰撞联系在一起。有人曾提出秦岭梁岩体形成于“碰撞的初期”(张静等, 2002)。实际上,即使这样考虑,该岩体及其他环斑结构花岗岩形成于碰撞初期的可能性不大,而应是后碰撞(至少是同碰撞晚期)。(1)华北与扬子板块的碰撞主要发生于245~220 Ma。大别山(超)高压年龄为245~221 Ma (Li *et al.*, 1989; Zhang H F *et al.*, 2001; Hacker *et al.*, 1998; 刘贻灿等, 2000)。Li 等(1993)明确提出确切的碰撞时间应在245

Ma 左右。特别是,近年来对超高压变质片麻岩峰期变质用锆石 U-Pb 法测定的年龄为 238 ± 1 Ma (Li *et al.*, 1997; 丛柏林和王清晨, 1999)。Zhang H F (2001) 新测得具 A 型特点的面理化石榴石花岗岩年龄为 234 ± 4 Ma 和 227 ± 5 Ma, 认为是后碰撞花岗岩。如果考虑由东向西的点碰撞(在大别山)和全面碰撞的时间差(Yin and Nie, 1996; 张国伟等, 2001; Dong *et al.*, 2002),碰撞作用向西可能略晚一些。但是据研究,在中、西秦岭地区以及沿勉略带发生的中生代碰撞峰期时间至少在221~242 Ma (李曙光等, 1996),其中可代表碰撞时间的绿片岩的年龄为240Ma (Yin *et al.*, 1991)。而老君山、秦岭梁岩体的锆石 U-Pb 年龄为214~217 Ma (卢欣祥等, 1999)。该地区其它环斑结构花岗岩(如沙河湾岩体)的年龄也为212~217 Ma (张宗清等, 1999),如果以240Ma 作为碰撞峰期的时间,环斑结构花岗岩的侵位至少晚了近23~28 Ma;从典型碰撞造山带研究情况看,后碰撞花岗岩的出现只比碰撞峰期变质晚了约26 Ma(如喜马拉雅),或10~20 Ma(如欧洲阿尔卑斯)(Sylvester, 1998);显然秦岭环斑结构花岗岩应该侵位于后碰撞,或者至少是同碰撞向后碰撞转折阶段。(2)老君山、秦岭梁等环斑结构花岗岩体远离勉略带,之间还隔着商丹缝合带(图1)，“碰撞初期”不可能产生这样远的远距离效应形成巨大的宝鸡花岗岩体(秦岭梁岩体是宝鸡岩体的一部分)。(3)上述岩体构造型式也与后碰撞(或同碰撞晚期)相对拉张的环境一致。

可见,不论是与一般同碰撞花岗岩的矿物组成和过铝质的地球化学特征(Harris, 1986)相比,还是从同碰撞向后碰撞转折的时间上(Sylvester, 1998)考虑,秦岭环斑结构花岗岩都不具有同碰撞花岗岩的特点,而是具有后碰撞甚至后造

山的特点。所以,假如秦岭环斑结构花岗岩与秦岭中生代碰撞有关,它们可能是同造山的,但并不是碰撞初期的挤压环境,而是后碰撞的相对拉张的环境(也不排除是同碰撞晚期可能,但由于它们不具有同碰撞花岗岩的岩石学和地球化学特征,故后碰撞的可能性更大)。如果仅仅考虑它们与商丹缝合带的关系,则应该属于后造山花岗岩。

5 讨论

5.1 环斑结构

上述老君山和秦岭梁岩体结构描述表明,其特征基本符合环斑结构的定义:卵球状碱性长石巨晶具斜长石外壳,部分卵球状长石不发育外壳,石英具两个世代(如 Vorm, 1976; Rämö and Haapala, 1995)。而且,据作者实地考察,它们与芬兰 Wiborg 特别是 Jaala-Iitti 等环斑花岗岩体的主体结构也是相似的。Haapala 教授和 Rämö 教授看了秦岭这些花岗岩标本和照片之后,也认为其是环斑结构(Wang *et al.*, 2002)。该结构实质特点是碱性长石巨晶(无论是有斜长石外壳还是没有)为卵球状,这是与一般花岗岩局部出现具斜长石外壳的较自形的碱性长石巨晶的主要区别(Rämö and Haapala, 1995)。如果说与典型的芬兰环斑花岗岩有差异的话,这些环斑长石形态在圆度上、在岩体中的分布范围和长石巨晶的含量上略低。这可能正是环斑结构花岗岩与典型的元古代非造山环斑花岗岩的差别之一。

应该指出的是,环斑结构与文献中有时出现的 mantled feldspar(膜状长石)(Stall, 1978; Wark and Stimac, 1992; Steltmann and Muller, 2003)有相似之处,但并不完全相同。mantled feldspars 强调的是碱性长石巨晶具斜长石外壳,而环斑结构强调的是长石的卵球状(ovoid)特点,包括有斜长石壳的(mantled)(也称 Wiborg 型),特别是也包括无壳(unmantled)的碱性长石(也称 Pyterlite 型)(Vorma, 1976),其意义更广,它可以包含、也可以不包括 mantled feldspar。中国福建等地区一些 I-A 型复式花岗岩体中也发育有具斜长石外壳的碱性长石巨晶,但为半自形(周珣若等,1994)。有学者认为这些岩石为更长环斑二长花岗岩(周珣若等,1994);有的学者将这种结构称之为膜状长石(mantled feldspar)(周新民私人通信),这可能是比较客观的。由此可见,秦岭环斑结构与这种膜状长石可能是不同的,而与正常的斑状花岗质岩石和一般花岗岩局部出现具斜长石外壳的较自形的碱性长石巨晶就更不同了,本质差别在于是否发育卵球状碱性长石(包括无斜长石外壳的)。

需要指出的是,不同地区的环斑花岗岩在结构上是有差异的。例如,芬兰南部 Wiborg 岩体的环斑结构最为典型(环斑结构定义就源自于此, Vorm, 1976; Rämö and Haapala, 1995);而 Jaala-Iitti 环斑花岗岩(Salonsaari, 1995)和巴西 Itu 地区环斑花岗岩的环斑结构(Wernick *et al.*, 1997)就有所不同,后者环斑长石有卵球状,有自形和/或不规则状。中国最典型的北京密云环斑花岗岩的环斑结构与 Wiborg 岩体的也有差别,如前者碱性长石巨晶粒径大并多是聚晶(郁建华等,

1996),而后者粒径小且多是单晶(Vorma, 1976)。另外,即使同一个环斑花岗岩体,结构变化也是很大的,如芬兰 Wiborg 和 Jaala-Iitti 等岩体有些地带环斑结构欠发育或不发育。密云环斑花岗岩体也是如此(郁建华等, 1996);秦岭环斑结构花岗岩同样也是如此。因此,只有进行详细、全面的野外观察,才可能对该岩体是否发育环斑结构有一个全面、客观的认识。

关于环斑结构成因,一直未能很好地解决。从上述环斑长石特征(图 2)和观察到的岩浆混合的证据(王晓霞等, 2002a)来看,岩浆混合、物理化学条件的变化可能是秦岭环斑结构形成的主要原因,而交代和巨晶-残余岩浆的化学反应(张静等, 2002)的可能性较小(另文专述)。

5.2 环斑结构花岗岩的属性

发育环斑结构的花岗岩是不是环斑花岗岩或环斑结构花岗岩?从广义的角度来讲,发育环斑结构的花岗岩就是环斑花岗岩(如 Vorm, 1976),至少是环斑结构花岗岩(rapakivi-textured granite)或环斑状花岗岩(rapakivi-like granite)(Vinogradov and Vinogradova, 1991; Luttinen and Siivola, 1996; Haapala *et al.*, 1995; 王晓霞等, 2002a)。

Haapala 和 Rämö(1992)指出环斑花岗岩还应具有 A 型花岗岩的特点。据此,有的研究者认为秦岭环斑结构花岗岩不具有 A 型特点,所以不是环斑花岗岩(赵太平, 2001)。这个问题值得讨论和商榷。(1)该定义是 1992 年基于典型元古代非造山环斑花岗岩的总结,实质上想突出非造山的特点(因大多数环斑花岗岩并非是无水和碱性)。但新的研究表明在造山带中可以发现环斑花岗岩。因此,再用非造山的环境来定义和限定环斑花岗岩显然与实际不符。(2)从新的大量资料统计来看,世界上环斑花岗岩岩石类型变化很大,不一定是 A 型(Rämö and Haapala, 1996),巴西岛弧环斑花岗岩就具 I 型的某些特征(Wernick *et al.*, 1997; Haapala and Rämö, 1999)。(3)不同时代和环境中的环斑花岗岩有差异。(4)无论是从实际研究情况来看,还是从理论上讲,花岗岩类岩石常常犹如光谱一样是连续过渡变化的(Leak, 1990),对于不能归于人为划分的类型(如 A、I、S 型)的过渡特点的花岗岩要给予客观的认识。

本文研究表明,在地球化学上,老君山和秦岭梁岩体既与典型 A 型花岗岩有差异,又不完全相同于典型的 I(或 S)型花岗岩,而显示 I-A 过渡特点,对这种花岗岩很难肯定是不是 A 型花岗岩。但在结构上,它们又明显有别于一般花岗岩,而相似于环斑花岗岩。这正是目前注意研究的环斑结构花岗岩,也可能是一种非典型环斑花岗岩。

环斑结构花岗岩提出的时间不长,具体与环斑花岗岩如何区别有待于研究。目前似乎只是和芬兰一些典型的元古代、非造山环斑花岗岩对比,将与其相似并有一些差异的花岗质岩石称为环斑结构花岗岩(rapakivi-textured granite)或环斑状花岗岩(rapakivi-like granite)。很多环斑结构花岗岩与环斑花岗岩同期、同环境产出,如乌拉尔造山带(Zavaritsky, 1937)。有些环斑结构花岗岩(Haapala *et al.*, 1995)经过研究后又称之为环斑花岗岩(Rämö and Haapala,

1995)。因此,它们可能具有相似的构造环境意义,有必要加以重视和研究。

再者,对于花岗岩类岩石而言,其成分差异不很明显,因此,区别其形成条件、构造环境的难度很大。所以,当结构上出现明显差别时(如环斑结构),应该给予特别的关注和重视。从岩石学角度,我们将上述岩石称之为环斑结构花岗岩,这是一种中性的描述性术语。它一方面具有显而易见的岩相学特征,另一方面,可能又具有特定的岩石成因和地球动力学意义;如秦岭环斑结构花岗岩可能反映了岩浆结晶过程中物理化学条件及岩浆成分的特殊变化,并可能揭示了造山带演化的特点。因此,在此基础上,我们还可以进一步探讨其构造环境意义。

5.3 两类环斑花岗岩:非造山和造山带型环斑花岗岩

如上所述,秦岭环斑结构花岗岩产于造山带,并定位于后碰撞(或同碰撞晚期)或后造山相对拉张的环境。这与典型元古代、非造山(A型)环斑花岗岩有差异,但实质环境又有一定的联系和相似性,即相对稳定和伸展的环境(区域性或局部的);后者是典型的稳定和伸展的非造山环境,而前者是由造山挤压向相对稳定、伸展环境的转折过渡,即向典型非造山环境发展过渡的演化阶段。可能正因如此非典型的过渡特点,才产生了具有过渡特点的非典型环斑花岗岩。另外,从秦岭造山带来看,花岗岩具有多期性,并广泛分布于不同的构造单元;而上述环斑结构花岗岩却只出现于中生代,分布在商丹缝合带一带,并且规模巨大,这必然有其特定的原因,可能揭示了造山过程中的一种特殊作用,应视为一种特殊的地质体。所以,与非造山环斑花岗岩相对应,可能存在一种造山带型环斑花岗岩(肖庆辉等,2002;卢欣祥等,2003),即与造山作用有关的一种环斑花岗岩或环斑结构花岗岩,如秦岭造山带环斑结构花岗岩和巴西造山带环斑花岗岩(Wernick *et al.*, 1997; Haapala and Rämö, 1999)。

如果这种推测成立,那么,环斑花岗岩有可能存在两类:一类是非造山环斑花岗岩(即一般所说的典型A型环斑花岗岩),它们是稳定大陆伸展构造环境下的产物;另一类可能就是造山型非典型(A、A-I或I型)环斑花岗岩,它们可以形成于同造山相对伸展的部位,也可以形成于挤压造山后相对稳定的伸展时期(后碰撞或后造山环境)。这似乎如同A型花岗岩,原来认为只有非造山的,后来研究表明也有产于造山带的。

无论是从岩石学角度提出的环斑结构花岗岩还是从构造环境上提出的造山带型环斑花岗岩都避免了与典型非造山环斑花岗岩的某些差异而引起的有关归属和名称的争议;又显示了与典型环斑花岗岩的相似性和产于造山带的特殊性;特别是突出了与一般的花岗岩的不同。这样有利于突出其特性,揭示出可能蕴涵的重要的地质意义。当然,这些只是一个初步想法和尝试,它有待于今后进一步研究、检验和完善。至于最终与典型非造山环斑花岗岩的关系,还需要各国岩石学家共同合作研究。

6 结论

(1)老君山和秦岭梁花岗岩发育环斑结构:碱性长石巨晶多呈卵球状,多数具有斜长石外壳;碱性长石和石英均有两期。它有别于一般花岗岩局部出现自形具斜长石外壳的碱性长石巨晶的结构,是环斑结构花岗岩或环斑花岗岩的标志性特征。

(2)该岩石具有I-A型花岗岩的过渡特点;其地球化学特征和岩体侵位构造特点以及区域地质背景的综合研究一致显示,它们侵位于后碰撞或后造山环境。这些与典型非造山环斑花岗岩有一定差异,但与巴西造山带环斑花岗岩相似,可能是一种造山带型环斑花岗岩。这样,环斑花岗岩可能存在两类:非造山(典型A型)和造山(后)型(A-I过度或I型)。

环斑结构花岗岩和造山带型环斑花岗岩的提出可以较好地突出它们与典型环斑花岗岩的异同和与一般花岗岩的不同,以避免因对一些名称术语的不同理解和争议而掩盖了可能蕴涵的科学意义。

致谢 感谢毛景文研究员、张国伟院士以及芬兰赫尔辛基大学地质系I. Haapala教授和O. T. Rämö教授给予的指导和有益的学术讨论。洪大卫研究员审阅了初稿并提出了修改意见,有些问题还请教过南京大学周新民教授。在此致谢!

References

- Batchlor R B and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters, *Chem. Geol.*, 48: 43-55
- Cong Boling and Wang Qingcheng. 1999. Progress no ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Su-lu Region of China. *Chinese Science Bulletin*, 44(11): 1127-1411 (in Chinese)
- Dong Shuwen, Wu Hongling and Liu Xiaochun. 2002. On continent-continent point-collision and ultrahigh-pressure metamorphism. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 69-80
- Eby G N. 1992. The Chemical subdivision of the A type granitoids: Petrogenesis and tectonic implication. *Geology*, 20: 641-644
- Haapala I and Rämö O T. 1992. Tectonic setting and origin of the Proterozoic rapakivi granite of southeastern Fennoscandia. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 165-171
- Haapala I, Rämö O T and Volborth A. 1995. Miocene rapakivi-like granites of southern Newberry Mountains, Nevada, U. S. A.: comparison to the Proterozoic rapakivi granites of Fianland. In: Brown M and Piccoli PM (eds.), *The origin of granites and related rocks. Thrid Hotton Symposium Abstracts*, U. S. Geological Survey Circular, 1129: 61-62
- Haapala I and Rämö O T. 1999. Rapakivi granite and related rocks: an introduction. *Precambrian Research*, 95(1-2): 1-7
- Hacker R B, Ratschbacher L and Webb L. 1998. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215-230
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M P, Ries A C (eds.), *Collision Tectonics*, Vol. 19. *Geol. Soc. Spec.*

- Publ., 67-81
- Leak B E. 1990. Granite magmas, their sources, initiation and consequences of emplacement. *J. Geol. Soc. Lond.*, 147:579-589
- Lerch M F, Xue F, Kröner A, Zhang G W and Tod W. 1995. Middle Silurian - Early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of Central China. *J. Geology*, 103: 437-449
- Li Shuguang and Sun Weidong. 1996. A middle Silurian - Early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of Central China: A discussion. *J. Geology*, 104: 501-503
- Li Shuguang, Hart S R, Zheng Shuanggen, Guo Anling, Liou Deliang and Zhang Guowei. 1989. Timing of collision between the North and South China Blocks: Sm-Nd isotopic age evidence. *Science in China (Series D)*, 32: 1391-1400
- Li S G, Li H and Chen Y. 1997. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Su-Lu terrane: II. U-Pb isotope system of zircon. *Science in China (Series D)*, 27(3): 200-206
- Li Shuguang, Xiao Yilin and Liou Deliang. 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89-111
- Li Shuguang, Sun Weidong, Zhang Guowei *et al.* 1996. Chronology and geochemistry of Heiguoxia volcanic rocks from Mianlue tectonic belt South Qinling: Evidence for Palaeozoic ocean and its age of close. *Science in China*, 26(3): 223-230 (in Chinese)
- Liu Yishan, Li Shuguang, Xu Shutong, Li Huimin, Jiang Laili, Chen Guobao, Wu Weiping and Su Wei. 2000. U-Pb Zircon Ages of the Eclogite and Tonalitic Gneiss from the Northern Dabie Mountains, China and Multi-Overgrowths of Metamorphic Zircons. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 417-423 (in Chinese with English abstract)
- Li Wuping, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2001. Source of Huichizi granitoid pluton in northern Qinling, central China: constrained in element and isotope geochemistry. *Earth Science*, 26(3): 269-278 (in Chinese with English abstract)
- Luttinen A V and Siivola J U. 1996. The Megacrystic granite of Mannefalknausane: Proterozoic rapakivi-like magmatism in Dronning Maud Land, Antarctica. Symposium on rapakivi granite and related rocks, University of Helsinki, Helsinki, Finland, Abstract volume
- Lu Xinxiang, Dong Yong, Chang Qinling, Xiao Qinghui, Li Xiaobo, Wang Xiaoxia and Zhang Guowei. 1996. Indosinian Shahewan rapakivi granite in Qinling and its dynamic significance. *Science in China*, 39(3): 266-272
- Lu Xinxiang, Wei Xiangdong and Xiao Qinghui. 1998. The discovery of rapakivi granite in the west Qinling. *Geological Review*, 14(5): 535-542 (in Chinese with English abstract)
- Lu Xinxiang, Wei Xiangdong, Xiao Qinghui, Zhang Zhongqing, Li Huimin and Wang Wei. 1999. Geochronological studies of rapakivi granites in Qinling and its geological implications. *Geological Journal of China Universities*, 15(4): 372-377 (in Chinese with English abstract)
- Lu Xinxiang, Xiao Qinghui and Dong You. 2000. Geological Map of granites in Qinling. Xi'an: Xi'an Map Publishing House (in Chinese)
- Lu Xinxiang, Wang Xiaoxia, Xiao Qinghui, Wei Xiangdong and Dong Yong. 2003. A reply to "A query on the so-called rapakivi granite in Qinling orogen". *Geological Review*, 49(2): 146-154 (in Chinese with English abstract)
- Mattauer M, Matte P, Malaveille J, Tappionier P, Malusci H, Xu Zh Q, Lu Y L and Tang Y Q. 1985. Tectonics of Qinling belt: build-up and evolution of Western Asia. *Nature*, 1985, 1085(317): 496-500
- Men Qingren and Zhang Guowei. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27(2): 123-126
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956-983
- Rämö O T and Haapala I. 1995. One hundred years of rapakivi granite. *Mineralogy and Petrology*, 52: 129-146
- Rämö O T and Haapala I. 1996. Rapakivi granite magmatism: a globe review with emphasis on petrogenesis. In: Demaiffe D (ed.), *Petrology and geochemistry of magmatic suites of rock in the continental and oceanic crusts. A volume dedicated to Professor Jean Michot*. University Libre de Bruxelles, Royal Museum for Central Africa (Tervuren), 177-200
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A., Webb L E, Crimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong S and Hu J. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology and deformation history. *Tectonophysics*, 366: 1-53
- Steltmann R and Muller A. 2003. From mantled feldspar to snowball quartzes: petrogenesis of the Eastern Erzgebirge granite pluton. *Granitic Systems-State of the Art and Future Avenues, An International Symposium in Honor of Professor Ilmari Haapala*, University of Helsinki, Helsinki-Finland. January, Abstract, 96-99
- Stimac J A and Wark D A. 1992. Plagioclase mantles on sanidine in silicic lavas, Clear Lake, California; implications for the origin of rapakivi texture. *Geological Society of America Bulletin*, 104(6): 728-744
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites. *J. Geol.*, 97: 261-280
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29-44
- Stall R J. 1978. Mantled feldspars from the Golden Horn batholith, Washington. *Litho*, 1: 243-249
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implication and processes. In: Saunders A D, Norry M J (ed.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42:313-345
- Sun W D, Li S G, Chen Y D and Li Y J. 2002. Timing of synorogenic granitoids in the south Qinling, central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. *J. Geol.*, 110: 457-468
- Salonsaari P T. 1995. Hybridization in the subvolcanic Jaala-Iitti complex and its petrogenetic relation to rapakivi granite and association mafic rocks of southeastern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 67(16): 5-104
- Wang Tao, Wang Xiaoxia and Li Wuping. 2000. Evaluation of multiple emplacement mechanisms of Huichizi granite pluton, Qinling orogenic belt, central China. *J. Struct. Geol.*, 22(4): 505-518
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Haapala Ilmari and Lu Xinxiang. 2002. The Shahewan rapakivi-textured granite, Qinling orogen, central China: mineral composition and petrogenetic significance. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 74(1-2): 133-146
- Wang Xiaoxia and Lu Xinxiang. 1998. A study of biotite from the Shahewan rapakivi granite in Qinling and its significance. *Acta Petrologica et Mineralogica* 17(4): 352-358 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xiaoxia, Wang Tao and Lu Xinxiang. 2001. Studies and problems on rapakivi granites. *Geological Science and Technology Information*, 20(4): 19-23 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Lu Xinxiang and Xiao Qinghui. 2002a. Petrographic evidence of hybridization magmas of the Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granites in the North Qinling and its significance. *Geological Bulletin of China*, 21(8-9):523-529 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xiaoxia, Wang Tao and Lu Xinxiang. 2002b. Rapakivi texture of the Mesozoic Shahewan granite and related problems, North Qinling, central China. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 30-36 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xiaoxia. 2003. Mesozoic rapakivi-textured granitoids from North Qinling and their setting of tectonic dynamics. PhD dissertation. Beijing: China University of Geosciences.
- Wang Xiaoxia and Lu Xinxiang. 2003. Mineral characteristics of Shahewan rapakivi textured granite in north Qinling and its petrological significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(1): 57-62 (in Chinese with English abstract)
- Wark D A and Stimac J A. 1992. Origin of mantled (rapakivi) feldspars: experimental evidence of a dissolution- and diffusion-controlled mechanism. *Contrib. Miner. Petrol.*, 111:345-361
- Wernick E, Galembeck T M B and Godoy A M. 1997. Geochemical variability of the rapakivi Itu Province, state of Sao Paulo, SE

- Brazil. In: Dall'Agnol R, Bettencourt JS (eds.). Proceedings of the Symposium on Rapakivi Granites and Related Rocks, Belem (Brazil), August 1995. Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 69: 395–413
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407–419
- Vorma A. 1976. On the petrochemistry of rapakivi granites with special reference to the Laitila massif, southwestern Finland. Geological Survey of Finland, 285
- Vinogradov A N and Vinogradova G V. 1991. Rapakivi-like charnockites of the Umba complex on the Kola Peninsula: two-stage model of origin. Symposium on rapakivi granite and related rocks, University of Helsinki, Helsinki, Finland, Abstract volume
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, Hong Dawei, Mo Xuanxue, Lu Xinxian, Li Zhichang, Wang Xiongwu, Ma Changqian, Wu Fuyuan, Luo Zhaohua, Wang Tao. 2002. The ways of investigation on granitoids. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- Xue F, Krner A, Reischmann T and Lerch F. 1996. Paleozoic pre- and post-collision calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks. J. Geol. Soc. London, 153: 409–417
- Yin A and Nie S. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring region. In: Yin A and Harrison T M (ed.). The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University Press, Cambridge, 442–485
- Yin Q, Jagoutz E and Kroner A. 1991. Precambrian (?) blueschist/coesite-bearing eclogite belt in central China. Terra Abstract, 3: 85–86
- Yu Jianhua, Fu Huiqin, Zhang Fenglan, Wan Fangxiao, Haapala I, Rämö T O and Vaasjoki M. 1996. Anorogenic rapakivi granite and related rock in northern margin of the north China craton. Beijing: Science and Technology House Press (in Chinese with English abstract)
- Zavaritsky A N. 1937. The petrography of Berdianush pluton. Leningrad: Geological and Exploratory Publishing House, 406 (in Russian)
- Zhang Guowei, Xiang Liwen and Men Qingren. 1995. The Qinling orogeny and intercontinental orogeny mechanisms. Episodes, 8: 36–39
- Zhang Guowei, Men Qingren, Yu Zaiping, Sun Yong, Zhou Dingwu and Gou Anlin. 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen: Science in China (Series D), 39: 225–234
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xueren and Xiao Qinghui. 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics. Beijing: Science Press, 320–321; 430–431 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Hongfei, Gao Shan, Zhang Benren, Luo Tingchuan and Wen Lilin. 1997. Pb isotopes of granitoid suggest Devonian accretion of Yangtze (South China) craton to North China Craton. Geology, 25 (11): 1015–1018
- Zhang Hongfei, Zhong Zengqiu, Gao Shan, Zhang Benren and Li Huiming. 2001. U-Pb zircon age of the foliated garnet-bearing granites in western Dabie Mountains, Central China. Chinese Science Bulletin, 46(19): 1657–1661
- Zhang Jing, Chen Yanjing, Shu Guiming, Zhang Fuxing and Li Chao. 2002. A study on the mineral composition of Qinlingiang granite pluton in southwestern Shaanxi and a discussion on related problem. Science in China (ser. D), (2): 113–120 (in Chinese)
- Zhang Zhongqing, Zhang Guowei, Tang Suhan and Lu Xinxian. 1999. Age of the Shahewan rapakivi granite in Qinling orogen, China and its constraints on the end time of the major orogenic stage of this orogen. Science in China, 44(9): 981–983 (in Chinese)
- Zhao Taiping. 2001. A query on the so-called rapakivi granite in Qinling orogen. Geological Review, 17(5): 487–491 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Xunrue and Wu Kelong. 1994. Zhangzhou I-A type composite granite. Beijing: Science publishing House (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 从柏林, 王清晨. 1999. 大别山-苏鲁超高压变质带研究的最新进展. 科学通报, 44(11): 1127–1411
- 李曙光, 孙卫东, 张国伟等. 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据. 中国科学(D辑), 26(3): 223–230
- 李伍平, 王涛, 王晓霞. 2001. 北秦岭灰池子花岗质复式岩体的源岩讨论: 元素-同位素地球化学制约. 地球科学, 26(3): 269–278
- 卢欣祥, 尉向东, 肖庆辉等. 1998. 西秦岭发现奥长环斑花岗岩带. 地质论评, 14(5): 535–542
- 卢欣祥, 尉向东, 肖庆辉, 张宗清, 李惠民, 王卫. 1999. 秦岭环斑花岗岩的年代学研究及意义. 高校地质学报, 5(4): 373–377
- 卢欣祥, 王晓霞, 肖庆辉, 尉向东, 董有. 2003. 对“对秦岭奥长环斑花岗岩的质疑”的答疑. 地质论评, 49(2): 146–154
- 卢欣祥, 肖庆辉, 董有. 2000. 秦岭花岗岩大地构造图. 西安: 西安地图出版社.
- 刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 李惠民, 江来利, 陈冠宝, 吴维平, 苏文. 2000. 大别山北部榴辉岩和英云闪长质片麻岩锆石 U-Pb 年龄及多期变质增生. 高校地质学报, 6(3): 417–423
- 王晓霞, 卢欣祥. 1998. 秦岭沙河湾环斑花岗岩中黑云母的研究及意义. 矿物岩石, 17(4): 352–358
- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥. 2001. 环斑花岗岩研究及存在的问题. 地质科技情报, 20(4): 19–23
- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 肖庆辉. 2002a. 北秦岭老君山、秦岭梁环斑结构花岗岩岩浆混合的岩相学证据及其意义. 地质通报, 21(8–9): 523–529
- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥. 2002b. 北秦岭中生代沙河湾岩体环斑结构及有关问题的讨论. 地球学报, 23: 30–36
- 王晓霞. 2003. 北秦岭中生代环斑结构花岗岩及构造动力学背景. 中国地质大学(北京)博士论文.
- 王晓霞, 卢欣祥. 2003. 北秦岭沙河湾环斑结构花岗岩的矿物学特征及其岩石学意义. 矿物学报 23(1): 57–62
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, p208–281
- 郁建华, 傅会芹, 张凤兰, 万方晓, I. 哈巴拉, O. T. 拉莫, M. 发斯乔基. 1996. 华北地台北部非造山环斑花岗岩及有关岩石. 北京: 中国科学技术出版社
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 卢欣祥. 1999. 秦岭沙河湾奥长环斑花岗岩的年龄及其对秦岭造山带主造山期时间的限制. 科学通报, 44(9): 981–983
- 赵太平. 2001. 对秦岭奥长环斑花岗岩的质疑. 地质论评, 17(5): 487–491
- 张静, 陈衍景, 舒桂明, 张复新, 李超. 2002. 陕西西南部秦岭梁花岗岩体的矿物成分研究和相关问题讨论. 中国科学(D辑), 2: 113–120
- 张国伟, 张本仁, 袁学城, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 706–724
- 周珣若, 吴克隆. 1994. 漳州 I-A 型花岗岩. 北京: 科学出版社