

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

大别山沙村辉长岩中长石的结构水及其 对岩浆演化的指示

郝艳涛, 夏群科, 丁强, 杨晓志, 于慧敏, 盛英明

中国科学院壳幔物质与环境实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥, 230026

内容摘要: 本文报道了大别山沙村地区碰撞后辉长岩的化学组成和其中斜长石的傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 分析结果。10个辉长岩从化学组成上分为两组, 代表了两个不同的岩浆。斜长石普遍含有结构水, 以 OH^- 的形式存在, 含量为 $213 \times 10^{-6} \sim 658 \times 10^{-6}$ (H_2O 的质量分数)。结合大别山榴辉岩的数据来看, 由长石中结构水含量推测的原始岩浆的富水特征可能与其源区中含有俯冲断离的榴辉岩有关。两组辉长岩中的长石都表现出水含量与全岩 $\text{Mg}^\#$ 值的负相关关系, 即随着结晶分异的进行, 岩浆中的水含量在逐渐减少。这可能是由于角闪石的连续结晶和/或岩浆的去气作用造成的。沙村长石水含量与全岩 $\text{Mg}^\#$ 值之间的相关性说明后期热液蚀变事件没有改变长石中的水, 它们依然有效地保存了原始信息。

关键词: 结构水; 红外光谱; 长石; 辉长岩; 沙村; 大别山

长石是最重要的造岩矿物之一, 也是地壳中最广泛的物相。虽然长石的理想化学式中不含氢, 是“名义上的无水矿物”, 但是近些年的分子光谱学观察显示其结构中可以含有微量或少量的氢, 一般以 OH^- 或 H_2O 的形式存在 (Lehman, 1984; Hofmeister et al., 1985a, 1985b; Beran, 1986; Rossman, 1988, 1996; Kronenberg et al., 1996; 夏群科等, 2001; Johnson et al., 2003, 2004), 按照地质学上的习惯统称为结构水。微量结构水的存在对长石的许多物理化学性质 (力学强度、流变学特征、颜色的变化、元素扩散和交换等) 都有显著的影响 (Rossman, 1996)。尽管对于长石中微量结构水的研究已近二十年, 但是天然样品的资料并不多, 尤其是对长石中微量水所蕴含的地质意义的挖掘还远远不够。

在基性岩浆的演化过程中, 长石是几乎贯穿始终的分离结晶相, 对其结构水的观察是提供原始岩浆中水含量和岩浆过程中水的演化信息的有效途径。本文利用傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 技术对来自大别山北部安徽省岳西县沙村地区的10个辉长岩中的斜长石进行了观察, 确定了结构水的存在和赋存方式, 测定了水含量。结合大别山榴辉岩的工作, 初步探讨了沙村辉长岩源区富水特征的可能来源; 结合辉长岩全岩的化学组成初步讨论了岩浆结晶分

异过程中水的演化。

1 样品和分析方法

10个样品采自安徽岳西沙村的辉石—辉长岩体中, 均为角闪辉长岩 (图1)。沙村岩体的围岩是花岗片麻岩, 本文的10个样品 (SC1~SC12) 是由北至南依次采集的, 即 SC1 最靠近北边的围岩, 而 SC12 最靠近南边的围岩。锆石 U-Pb 分析 (葛宁洁等, 1999; 赵子福等, 2003) 显示, 沙村岩体的侵位年龄为 128 Ma, 是碰撞后的侵入体, 岩体在 110 Ma 经历了一次热液蚀变事件。辉长岩样品都很新鲜, 矿物组合为单斜辉石+斜长石+角闪石+黑云母。薄片观察表明, 单斜辉石和斜长石多自形或半自形, 以平衡的三联点结构共生, 是原生的岩浆矿物, 颗粒直径都在 3~4 mm 以上; 角闪石有两种, 一种以自形或半自形晶存在, 浅褐色, 与单斜辉石和斜长石以平衡的三联点结构共生, 是原生矿物, 另一种淡绿色, 多包裹或者交代辉石, 是后期热液交代辉石形成的; 黑云母多分布在辉石的颗粒间隙, 有的交代辉石, 有的交代角闪石, 也是后期热液交代形成的。对两种角闪石的电子探针分析表明, 第1种贫 Si、Mg 而富 Ti、Fe、Al、Na、K, 属韭闪石 (pargasite), 第2种属浅闪石 (edenite) (Leake et al., 1997)。对于角闪石族矿物

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号 40172027, 40033010) 的成果。

收稿日期: 2005-08-13; 改回日期: 2006-05-18; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 郝艳涛, 男, 1982年生。硕士研究生, 地球化学专业。通讯地址: 230026, 合肥, 中国科学技术大学地球和空间科学学院。

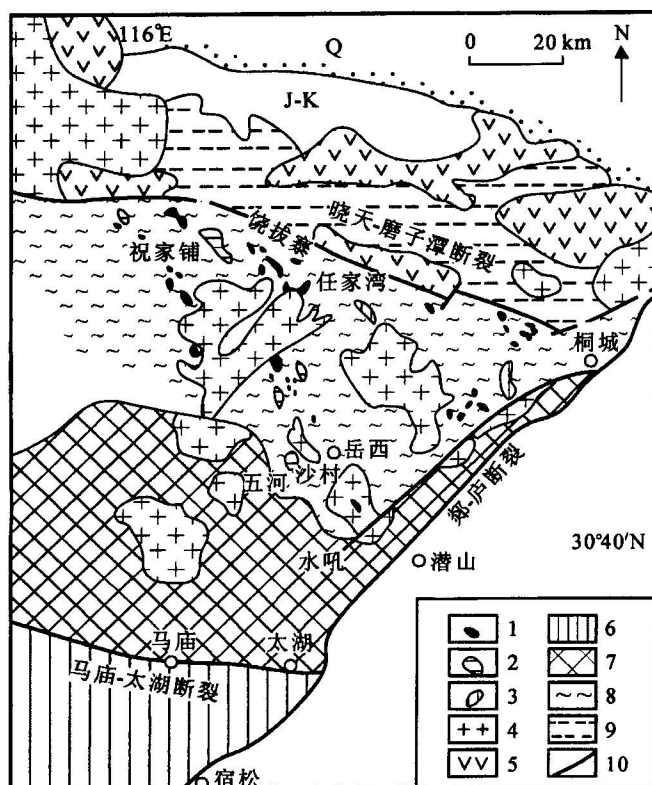


图 1 沙村在大别山的位置(据李曙光等,1997修改)

Fig. 1 The location of Shacun in the Dabie Mountains(modified after Li et al.,1997)

1—橄榄岩; 2—辉石岩; 3—辉长岩; 4—花岗岩; 5—火山岩;
6—低温榴辉岩及蓝片岩带; 7—超高压变质带; 8—混合片麻岩;
9—佛子岭和卢镇关群; 10—断层

1—Peridotite; 2—pyroxenite; 3—gabbro; 4—granite; 5—volcanic
rock; 6—LT eclogite and blueschist zone; 7—UHP zone; 8—
migmatite; 9—Foziling and Luzhenguan Group; 10—fault

的大量研究表明(Deer et al., 1992), 韭闪石是典型的
的岩浆矿物, 而浅闪石多是流体交
代辉石形成的, 这与岩相学观察是
一致的, 也与沙村浅闪石贫 Ti、Fe、
Al、Na、K 而富 Si、Mg 的化学组成
吻合。

全岩的主量元素分析采用湿化
学方法, 在安徽省地矿局中心实验
室完成, 数据列于表1; 长石的主量
元素组成在法国 Nancy I 大学用
Cameca SX100型电子探针进行分
析, 每个样品均进行了多点多颗粒
的测定, 结果表明颗粒内部以及同
一样品内部不同颗粒之间的组成都
是均一的, 每个样品多点测定的平

均值列于表2。如上节所述, 沙村辉长岩中有两种角
闪石, 为了解它们在化学组成上的差异, 我们选择了
3个样品(SC2、SC5、SC7), 对其中的两种角闪石在
法国 Nancy I 大学用 Cameca SX100型电子探针进
行了分析, 多点多颗粒的测试显示颗粒内部以及同
一样品内部不同颗粒之间的组成都是均一的, 表3列
出了多点测定的平均值。

FTIR 分析在中国地质大学(武汉)珠宝学院
的大型仪器室完成, 使用 Nicolet 550型红外光谱仪, 探
测器为 MCT, 非偏振光。每分析一次样品后扣除一
次本底, 样品及空白的扫描次数均为64次, 分辨率为
8 cm⁻¹。用带有直径0.5~0.7 mm 小孔的铝片在20
倍显微镜下选择要分析的区域, 分析区域位于单个
颗粒内部, 没有可见的包裹体和裂痕。光谱的收集和
处理使用 OMNIC 软件。长石是光学上非均质的矿
物, 为减小使用非偏振光带来的误差, 每个样品测定
多个(5~10个)长石颗粒, 用平均值来代表长石中的
结构水含量。

2 结果和讨论

2.1 全岩的化学组成

全岩的化学分析结果列于表1。10个样品分为两
组, 第1组包括 SC1、SC2、SC3 和 SC4, 第2组包括剩
余的6个样品, 相对于第2组来说, 第1组样品表现出
较高的 Fe₂O₃ (4.71%~6.56% vs. 1.90%~
2.86%)、CaO (9.51%~11.89% vs. 6.91%~
9.00%)、TiO₂ (1.19%~1.30% vs. 0.51%~
1.14%) 和 较 低 的 MgO (7.66%~13.13%
vs. 11.07%~18.95%)。第1组样品的 Mg[#] 值

表 1 大别山沙村辉长岩的主要化学成分(%)

Table 1 Chemical compositions of gabbros from Shacun (%)

样品号	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC9	SC10	SC12
SiO ₂	46.42	51.28	51.35	51.95	49.56	49.77	49.86	54.77	55.36	51.44
Fe ₂ O ₃	6.56	5.13	4.71	4.83	1.90	2.32	2.65	2.26	2.13	2.86
Al ₂ O ₃	7.27	12.53	11.90	12.37	6.36	7.62	7.65	9.52	10.60	12.64
TiO ₂	1.30	1.21	1.22	1.19	0.58	0.51	0.52	0.85	0.79	1.14
CaO	11.89	9.69	9.55	9.51	8.41	8.66	9.00	7.73	7.13	6.91
FeO	8.89	6.80	6.92	6.74	8.67	8.14	7.70	12.59	5.90	6.35
MgO	13.13	7.66	8.62	7.86	18.95	17.78	16.96	0.21	11.07	11.21
P ₂ O ₅	0.15	0.11	0.15	0.13	0.07	0.17	0.19	0.14	0.19	0.56
MnO	0.20	0.14	0.14	0.14	0.16	0.17	0.16	1.57	0.13	0.13
K ₂ O	1.05	1.73	1.67	1.74	1.64	1.41	1.40	2.07	1.61	2.25
Na ₂ O	1.20	2.06	2.22	2.02	0.93	1.52	1.56	6.07	2.22	2.69
LOI	1.35	1.04	1.36	1.16	1.34	1.55	1.66	1.89	2.18	1.51
Total	99.42	99.39	99.80	99.65	99.53	99.62	99.33	99.66	99.31	99.70
Mg [#]	0.56	0.49	0.53	0.50	0.76	0.74	0.73	0.71	0.69	0.66

注: Mg[#] = [MgO/(MgO + 0.505 × FeO + 0.9 × Fe₂O₃)]。

表 2 沙村辉长岩中长石的化学成分 (%)

Table 2 Chemical compositions of feldspars from Shacun gabbros (%)

样品号	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC9	SC10	SC12
SiO ₂	58.15	58.63	58.86	52.82	58.77	63.11	63.59	63.50	63.92	62.69
Al ₂ O ₃	26.16	25.81	25.45	28.60	25.08	21.77	21.17	21.44	21.70	22.63
TiO ₂	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02
FeO	0.32	0.28	0.25	0.39	0.24	0.24	0.21	0.20	0.17	0.15
NiO	0.04	0.01	0.06	0.01	0.05	0.00	0.02	0.03	0.04	0.03
MnO	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.02
MgO	0.00	0.03	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
CaO	8.06	7.99	7.57	11.47	7.05	3.44	2.57	2.62	2.99	4.01
Na ₂ O	7.31	7.50	7.37	5.15	7.65	9.73	10.16	10.57	10.51	9.58
K ₂ O	0.29	0.17	0.29	0.22	0.26	0.63	0.72	0.09	0.26	0.25
Total	100.36	100.45	99.91	98.72	99.14	98.94	98.51	98.49	99.62	99.39
基于 8 个氧的阳离子数	Si	2.60	2.62	2.64	2.43	2.65	2.83	2.86	2.85	2.84
	Al	1.38	1.36	1.34	1.55	0.00	1.15	1.12	1.13	1.14
	Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	0.00	0.00	0.00	0.00
	Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Fe	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ca	0.39	0.38	0.36	0.56	0.34	0.17	0.12	0.13	0.14
	Na	0.63	0.65	0.64	0.46	0.67	0.85	0.89	0.92	0.91
	K	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01
An	37	37	36	54	33	16	12	12	13	19
Ab	61	62	63	44	65	81	84	88	85	80
Or	2	1	2	1	1	3	4	0	1	1

$[= \text{MgO}/(\text{MgO} + 0.505 \times \text{FeO} + 0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3)]$ 明显低于第 2 组 (0.49 ~ 0.56 vs. 0.66 ~ 0.76), 从 $\text{Mg}^\#$ 上看, 第 2 组样品代表的是一个原始岩浆, 而第 1 组样品代表了一个已经高度演化的岩浆。从 $\text{Mg}^\#$ 与 Al_2O_3 、 CaO 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的相关图解上看 (图 2), 两组样品经历了不同的演化途径, 也就是说, 第 1 组样品并不是第 2 组样品所代表的原始岩浆演化来的。

两组样品的 $\text{Mg}^\#$ 值都与 Al_2O_3 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 负相关, 与 CaO 、全碱正相关, 这与前人对北大别碰撞后辉石—辉长岩的化学分析结果相似 (李曙光等, 1997, 1998; Jahn et al., 1999; 赵子福等, 2003), 也与岩相观察表明的单斜辉石、斜长石和钙质角闪石是主要的分离结晶相是一致的。两组样品中斜长石的化学组成也存在明显的差异 (表 2), 第 1 组长石的 An 为 36 ~ 54, 而第 2 组明显偏低, 为 12 ~ 33。很明显, 斜长石低的 An 值是由于富 Ca

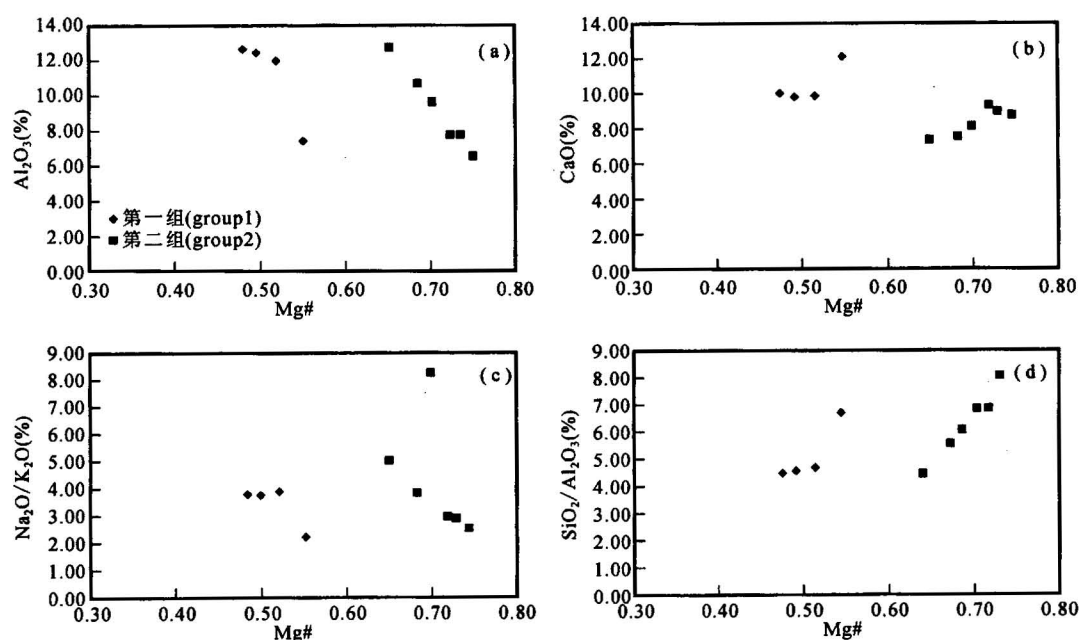


图 2 大别山沙村辉长岩化学成分的相关图解

Fig. 2 Geochemical variation diagrams for gabbros from Shacun

表 3 沙村辉长岩中两种角闪石的化学成分(%)

Table 3 Chemical compositions of two types of amphiboles from Shacun gabbros(%)

样品号	SC2		SC5		SC7	
角闪石种类	1	2	1	2	1	2
SiO ₂	43.62	50.73	42.52	52.34	42.34	50.03
Al ₂ O ₃	9.77	4.55	10.76	3.48	11.08	4.96
TiO ₂	2.65	0.68	2.34	0.45	1.10	0.29
Cr ₂ O ₃	0.02	0.05	0.04	0.26	0.47	0.11
FeO	12.79	11.35	12.21	9.17	11.35	10.06
NiO	0.04	0.08	0.02	0.08	0.02	0.01
MnO	0.21	0.26	0.11	0.15	0.14	0.13
MgO	13.42	17.00	14.03	18.34	14.46	18.28
CaO	11.66	11.44	11.33	11.51	11.41	11.16
Na ₂ O	1.81	1.09	2.17	0.94	2.64	1.46
K ₂ O	0.97	0.34	0.91	0.26	1.04	0.39
Total	96.94	97.58	96.44	96.98	96.04	96.88
基于23个氧的阳离子数						
Si	6.50	7.33	6.36	7.50	6.36	7.25
Ti	0.30	0.07	0.26	0.05	0.12	0.03
Al	1.72	0.78	1.90	0.59	1.96	0.85
Cr	0.00	0.01	0.00	0.03	0.06	0.01
Fe	1.59	1.37	1.53	1.10	1.43	1.22
Ni	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Mn	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02
Mg	2.98	3.66	3.13	3.92	3.24	3.95
Ca	1.86	1.77	1.82	1.77	1.84	1.73
Na	0.52	0.31	0.63	0.26	0.77	0.41
K	0.18	0.06	0.17	0.05	0.20	0.07

注:1为原生角闪石;2是后期热液蚀变的角闪石。

的单斜辉石和钙质角闪石大量结晶造成的。

2.2 长石中氢的赋存状态

含氢相是长石中普遍存在的微量成分,在绝大部分的长石的红外光谱上都能观察到。在纯净、未蚀变的晶体中观察到的 H₂O 或 OH⁻ 的红外吸收峰,统称为结构水 (Lemann, 1984; Beran, 1986; Kronenberg et al., 1996; Rossman, 1996)。FTIR 分析结果显示,在典型的 OH⁻ 红外吸收区 (3000~3800 cm⁻¹),所有分析的沙村长石颗粒都出现了吸收峰(图3)。根据峰位,吸收峰可大致分为4组:① 3200 cm⁻¹;② 3420 cm⁻¹;③ 3530 cm⁻¹;④ 3615 cm⁻¹。所有分析的颗粒都出现了第2组和第4组峰,部分分析点出现第1或者第3组峰。第1组和第2组样品中长石的 OH⁻ 峰位并没有明显差别。

长石中结构水的存在形式是较复杂的,概括起来有以下几个方面:矿物种类不同,结构水的存在形式不同;同一种矿物,其存在形式也可能有差异;在同一样品中, H₂O 分子和 OH⁻ 可能同时存在。Johnson 等(2004)详细观察来自不同地质环境的85个岩浆岩长石的红外吸收光谱,并对长石中不同含

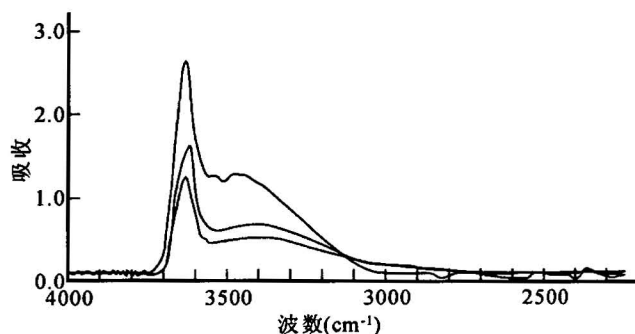


图 3 沙村长石代表性的红外谱图

Fig. 3 Representative IR spectra of feldspars from Shacun

氢相的红外吸收谱带进行了系统分类:结构水分为 I 型结构 OH⁻、II a 型结构 OH⁻、II b 型结构 OH⁻、I 型结构 H₂O、II 型结构 H₂O。I 型结构 OH⁻ 在 3500 cm⁻¹ 出现强吸收峰,在 3100 cm⁻¹ 有一较宽吸收峰;II a 型结构 OH⁻ 吸收峰较宽,出现在 3050~3200 cm⁻¹、3350~3450 cm⁻¹ 和 3575~3610 cm⁻¹;II b 型结构 OH⁻ 吸收峰在 3100 cm⁻¹ 和 3400 cm⁻¹ 两个位置;I 型结构 H₂O 的吸收峰包括 3620 cm⁻¹ 和 3550 cm⁻¹;II 型结构 H₂O 的吸收峰在 3440 cm⁻¹ 和 3280 cm⁻¹。沙村斜长石的红外吸收谱带与 II a 型结构 OH⁻ 的特征很相似。图4是 SC10 中2个长石颗粒的包括近红外区域的吸收谱图,它们在 4700 cm⁻¹ 出现了明显的吸收峰,这是 Si-OH 和 Al-OH 的组频,而没有出现 5200 cm⁻¹ 的吸收峰(H₂O 分子弯曲振动和伸缩振动的组频),证实含氢相的确是 OH⁻ 而不是 H₂O。也就是说,沙村斜长石中的结构水是以 OH⁻ 的形式存在的,这和人工作的结果“碱性长

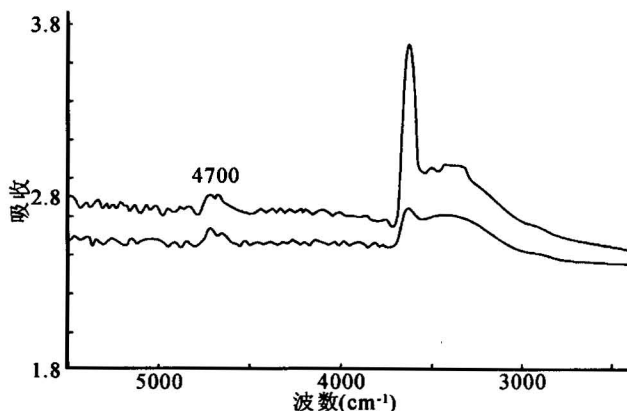


图 4 沙村辉长岩 SC10 中两个长石颗粒的红外谱图

Fig. 4 Near IR spectra of two feldspars in the gabbro SC10 from Shacun

石中结构水主要以 H_2O 分子形式存在而斜长石中结构水主要以 OH^- 形式存在”(Rossman, 1996)是一致的。

2.3 长石中结构水的含量

结构水含量(表示为 H_2O 的重量分数)的计算使用 Beer-Lambert 公式:吸收强度=吸收系数 $\times$ 厚度 $\times$ 方向因子 $\times$ 水含量。吸收强度用结构 OH^- 吸收峰的积分面积表示;吸收系数采用 Johnson 等(2003)根据 FTIR 和 ^1H MAS NMR 分析提供的值: $15.3(\times 10^{-6}) \text{H}_2\text{O} \cdot \text{cm}^2$;由于同一样品的厚度均匀(误差 $<10\%$),所以在计算同一样品内不同颗粒的水含量时使用多点测量(>35 个点,覆盖整个薄片)的平均值;方向因子取 $1/3$ (Paterson, 1982)。计算的水含量的误差来自以下几个方面:① 扣除基线(baseline)时的误差;② 薄片厚度不均匀造成的误差;③ Johnson 等(2003)推导吸收系数时根据的是7个长石样品的结构水含量(^1H MAS NMR 测定)与结构 OH^- 吸收峰的积分面积(FTIR 分析)的相关性,本身就有一定的误差,这也是本文计算出的水含量绝对值的主要误差来源。

将以上3点均考虑在内,我们估计水含量绝对值的误差为30%。但是由于沙村长石的红外谱图基本相似,应用同一个吸收系数不会造成不同样品水含量之间相对大小的差异,因此水含量之间相对大小误差主要来自前2点(扣除基线和薄片厚度不均匀),可能 $<10\%$ 。每个辉长岩样品中多个长石颗粒的平均水含量列于表4。

表4 沙村辉长岩中长石结构水的红外光谱分析结果

Table 4 FTIR results of feldspars from Shacun gabbros

	样品号	分析的颗粒数	$\text{H}_2\text{O}(\times 10^{-6})$
第1组	SC1	5	658
	SC2	6	213
	SC3	10	479
	SC4	10	252
第2组	SC5	7	624
	SC6	10	528
	SC7	5	446
	SC9	10	398
	SC10	7	230
	SC12	6	373

注:表中的 H_2O 含量是多个颗粒的平均值。

第1组为 $213 \times 10^{-6} \sim 658 \times 10^{-6}$,第2组样品的长石水含量为 $230 \times 10^{-6} \sim 624 \times 10^{-6}$,都表现出较大的变化,但是水含量与长石的化学成分之间没有相关性(图5)。Johnson 等(2004)的工作也表明长石中的结构水含量与成分不存在协变关系。这说明晶

体化学并不是控制长石中结构水含量的主要因素,长石中的水可能更大程度上反映的是岩浆中的水逸度(Rossman, 1996; Johnson et al., 2004)。迄今为止,还没有 H_2O 在长石和熔体中分配系数的报道。海洋玄武岩的详细研究表明(Michael, 1995; Danyushevsky et al., 2000), H_2O 在基性岩浆系统中是个不相容组分(即在固相—液相分配过程中优先进入液相),其固—液分配系数与 La、Ce 接近,为 0.01。如果假定 H_2O 在长石和熔体中的分配系数与此相同的话,那么沙村辉长岩原始岩浆中的 H_2O 含量在6%,远高于正常的幔源基性岩浆(Johnson et al., 1994; Michael, 1995; Sobolev et al., 1996; Danyushevsky et al., 2000)。沙村原始岩浆富水的特征与角闪石作为原生矿物的岩相学观察是一致的。

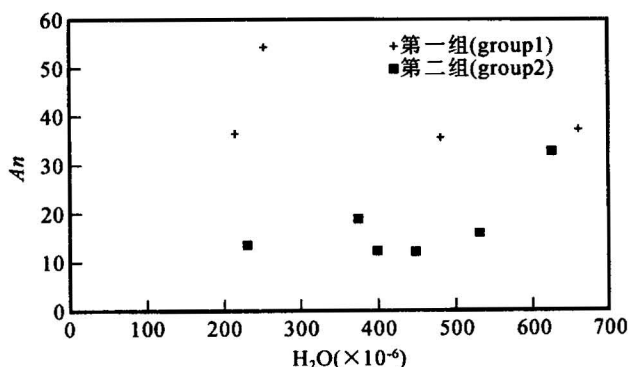


图5 沙村长石的结构水含量和 A_n 端元组分

Fig. 5 A_n vs. H_2O of feldspars from Shacun

包括沙村在内,大别山的碰撞后基性—超基性侵入体的地球化学性质具有以下共同特点:大离子亲石元素和轻稀土元素高度富集;微量元素蛛网图上表现出明显的高场强元素 Nb、Zr、Ti 负异常;高的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低的初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值(李曙光等, 1997, 1998; Jahn et al., 1999; 赵子福等, 2003),这些特点反映它们来自富集的地幔源区。沙村长石所暗示的源区的高水含量与沙村辉长岩不相容元素的高度富集(Jahn et al., 1999; 赵子福等, 2003)是匹配的。从沙村处在在大别山这样一个印支期陆—陆碰撞造山带的环境来说,源区的富水特征有两种可能的来源:① 板块碰撞过程中俯冲板块析出的流体交代了其地幔源区,此时北大别相当于一个地幔楔;② 其地幔源区含有高水含量的外来物质,如断离进入地幔的榴辉岩。目前已有的大量研究都倾向于认为,陆—陆碰撞过程中是扬子板块向华北板块

俯冲,而北大别是扬子板块的一部分(Hacker et al., 1998, 2000; Ratschbacher et al., 2000; Zhang et al., 2002; Bryant et al., 2004),也就是说,北大别并不是地幔楔,第1种可能性并不存在。而第2种可能性得到了大别山榴辉岩工作的支持,对大别山榴辉岩中石榴子石和绿辉石的红外光谱观察显示(夏群科等, 2000; 盛英明等, 2004a, 2004b),即使没有含水矿物的存在,石榴子石和绿辉石也能携带一定量的水,如碧溪岭超高压榴辉岩就可以含有高达 1000×10^{-6} 的 H_2O ,远高于正常地幔橄榄岩($< 300 \times 10^{-6}$, Bell et al., 1992)。板块俯冲到一定的深度,由于浮力和比重差异的作用,比重大的榴辉岩有可能从俯冲板块断离(breakoff),进入地幔。很明显,类似于碧溪岭榴辉岩这样的高水含量岩石进入地幔后就会形成一个富水的区域。由于大别山榴辉岩普遍亏损 ^{18}O (Zheng et al., 2003),因此榴辉岩参与形成北大别碰撞后基性—超基性侵入体的源区的推测也能很好地解释这些岩体中锆石的低 $\delta^{18}O$ 特征(赵子福等, 2003)。

2.4 长石水含量与全岩成分的相关性

有趣的是,沙村长石的水含量与全岩的化学成分之间存在一定的相关性。图6所示的是长石水含量与全岩 $Mg^{\#}$ 值之间的情况,可以看出,无论是第1组还是第2组辉长岩,长石 H_2O 含量与全岩 $Mg^{\#}$ 值之间都存在良好的正相关。这种相关性表明,随着结晶分异的进行,岩浆中的水含量在逐渐减少。有两个过程可以引起岩浆中水含量的不断降低:① 含水矿物的连续结晶,这与岩相学观察表明角闪石是沙村辉长岩中的原生矿物是一致的;② 去气作用,即随着结晶分异的进行,岩浆的水不断地逃逸出去,这也是

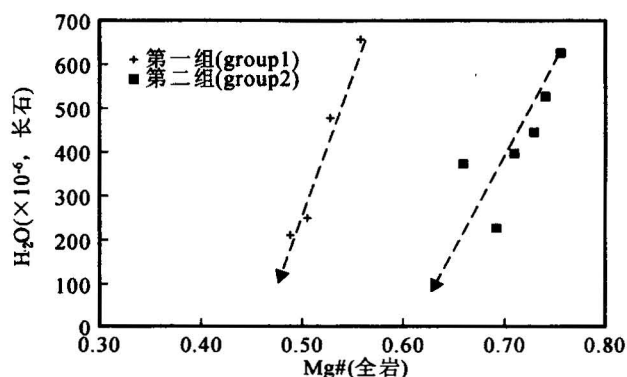


图6 沙村长石水含量与全岩 $Mg^{\#}$ 的相关图解

Fig. 6 Water content of feldspars vs. Mg number of whole rocks from Shacun

岩浆结晶分异过程中常常发生的情况,如 Xia 等(2004)通过安徽女山幔源单斜辉石的氢同位素工作就示踪到了玄武岩浆结晶分异过程中的去气作用。当然,对于沙村来说,很有可能的情况是以上两个过程共同发挥了作用。

尽管沙村岩体曾经经历过一次后期(110 Ma)的热液蚀变事件,而且可能影响了长石/辉石的氧同位素组成(赵子福等, 2003; 夏群科等, 未发表数据),但是长石水含量与全岩 $Mg^{\#}$ 值之间的相关性说明这一次事件并没有改变长石中的水,它们依然有效地保存了原始信息。

3 结论

(1) 大别山沙村地区的辉长岩从化学组成上分为两组,代表了两个不同的岩浆。

(2) 辉长岩中的长石普遍含有结构水,以 OH^- 的形式存在,含量为 $213 \times 10^{-6} \sim 658 \times 10^{-6}$ (H_2O 的重量百分比)。由长石的数据推测的原始岩浆的高水含量可能与其源区中含有俯冲断离的榴辉岩有关。

(3) 两组辉长岩中的长石都表现出水含量与全岩 $Mg^{\#}$ 值的负相关关系。这种相关性表明,随着结晶分异的进行,岩浆中的水含量在逐渐减少。岩浆中角闪石的连续结晶和/或去气作用是造成水含量不断降低的可能原因。

(4) 沙村长石水含量与全岩 $Mg^{\#}$ 值之间相关性的保存说明后期热液蚀变事件没有改变长石中的水,它们依然有效地保存了原始信息。

致谢:野外考察得到了安徽省地质调查研究院周存亭高级工程师的指导,红外光谱分析得到了中国地质大学张保民教授和狄敬如高级工程师的帮助,在此一并致谢。

参考文献 / References

- 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民, 陈江峰, 刘斌, 阮俊, 秦礼萍. 1999. 大别造山带岳西沙村镁铁—超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄. 科学通报, 44: 2110~2114.
- 李曙光, 聂永红, 郑双根, Hart S R. 1997. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——I. 大别山同碰撞镁铁—超镁铁岩的主要元素及微量元素地球化学. 中国科学(D辑), 27: 488~493.
- 李曙光, 聂永红, Hart S R, 郑双根. 1998. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——II. 大别山同碰撞镁铁—超镁铁岩的 Sr-Nd 同位素地球化学. 中国科学(D辑), 28: 18~23.
- 盛英明, 夏群科, 杨晓志, 于慧敏. 2004a. 大陆深俯冲过程中水分布的不均一性: 大别山碧溪岭榴辉岩中石榴子石的红外光谱分析. 科学通报, 49: 390~395.
- 盛英明, 夏群科, 于慧敏, 杨晓志. 2004b. 大别山碧溪岭和黄镇榴辉岩中绿辉石的结构水: 对原岩性质和动力学过程的制约. 岩

- 石学报, 20(5): 1133~1140.
- 夏群科, 陈道公, George Rossman, 支霞臣, 程昊, 吴元保. 2000. 高压—超高压变质流体的一种重要载体: 名义上的无水矿物. 地质论评, 46(5): 461~465.
- 夏群科, 潘尤杰, 陈道公, Kohn S C, 支霞臣, 郭立鹤, 程昊, 吴元保. 2001. 碱性玄武岩中长石巨晶的结构水: 红外光谱和核磁共振谱研究. 岩石学报, 16: 485~491.
- 赵子福, 郑永飞, 魏春生, 吴元保. 2003. 大别山沙村和椒子岩基性—超基性岩锆石 U-Pb 定年、元素和碳氧同位素地球化学研究. 高校地质学报, 9: 139~162.
- Bell D R, Rossman G R. 1992. Water in the earth's mantle: the role of nominally anhydrous minerals. *Science*, 255: 1391~1397.
- Beran A. 1986. A model of water allocation in alkali feldspar, derived from infrared spectroscopic investigations. *Phys. Chem. Mineral*, 13: 306~310.
- Bryant D L, Ayers J C, Gao S, Miller C F, Zhang H F. 2004. Geochemical, age, and isotopic constraints on the location of the Sino-Korean/Yangtze Suture and evolution of the Northern Dabie Complex, east central China. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 698~717.
- Danyushevsky L V, Eggins S M, Falloon T J, Christie D M. 2000. H₂O abundance in depleted to moderately enriched mid-ocean ridge magmas: Part I. Incompatible behaviour, implications for mantle storage, and origin of regional variations. *J. Petrol.*, 41: 1329~1364.
- Deer W A, Howie R A, Zussman J. 1992. An Introduction to the rock-forming minerals (2nd edition). Longman Group UK Limited, Essex. 696.
- Ge N J, Hou Z H, Li H M, et al. 2000. U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks from the Shacun, Yuexi area in the Dabie mountains. *Chin. Sci. Bull.*, 45: 75~79.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland D, Walker D, Dong S W. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci. Lett.*, 161: 215~230.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland D, Calvert A, Dong S W, Wenk H R, Chateigner D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east-central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. *J. Geophys. Res.*, 105: 13339~13364.
- Hofmeister A M, Rossman G R. 1985a. A model for the irradiative coloration of smoky feldspar and the inhibiting influence of water. *Phys. Chem. Mineral*, 12: 324~332.
- Hofmeister A M, Rossman G R. 1985b. A spectroscopic study of irradiation coloring of amazonite: structurally hydrous, Pb-bearing feldspar. *Am. Mineral*, 70: 794~804.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, Tsai C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chem. Geol.*, 157: 119~146.
- Johnson M C, Anderson A T Jr, Rutherford M J. 1994. Pre-eruptive volatile contents of magmas. In: Carroll M R, Holloway J R, eds. *Volatiles in Magmas*, Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America, Washington DC, 20: 281~330.
- Johnson E A, Rossman G R. 2003. The concentration and speciation of hydrogen in feldspars using FTIR and ¹H MAS NMR spectroscopy. *Am. Mineral*, 88: 901~911.
- Johnson E A, Rossman G R. 2004. A survey of hydrous species and concentrations in igneous feldspars. *Am. Mineral*.
- Kronenberg A K, Yund R A, Rossman G R. 1996. Stationary and mobile hydrogen defects in potassium feldspar. *Geochim Cosmochim. Acta*, 60: 4075~4094.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, Birch W D, Gilbert M C, Grice J D, Hawthorne F C, Kato A, Kisch H J, Krivovichev V G, Linthout K, Laird J. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names. *Mineral Mag.*, 61: 295~321.
- Lehmann G. 1984. Spectroscopy of feldspars. In: feldspars and Feldspathoids (Brown W. L. ed.), NATO ASI Series C, 137, 121~161.
- Li S G, Nie Y H, et al. 1997. Interaction between subducted continental crust and the mantle—I. major and trace element geochemistry of the syncollisional mafic-ultramafic intrusions in the Dabie Mountains. *Sci. China (Ser. D)*, 41: 545~552.
- Li S G, Nie Y H, Hart S R, et al. 1998. Interaction between subducted continental crust and the mantle—II. Sr and Nd isotopic geochemistry of the syncollisional mafic-ultramafic intrusions in the Dabie Mountains. *Sci. China (Ser. D)*, 41: 632~552.
- Michael P J. 1995. Regionally distinctive sources of depleted MORB: evidence from trace elements and H₂O. *Earth Planet Sci. Lett.*, 131: 301~320.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong S W, Calvert A, Chateigner D, Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *J. Geophys. Research*, 105: 13303~13338.
- Rossman G R. 1988. Vibrational spectroscopy of hydrous components. In: Hawthorne F C, ed. *Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology*. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, Washington DC, 18: 193~206.
- Rossman G R. 1996. Studies of OH in nominally anhydrous minerals. *Phys. Chem. Mineral*, 23: 299~304.
- Sheng Y M, Xia Q K, Yang X Z, et al. 2004a. Heterogeneity of water in UHP eclogite from Bixiling in Dabieshan: Evidence from garnet. *Chin. Sci. Bull.*, 49: 481~486.
- Sheng Y M, Xia Q K, Yu H M, et al. 2004b. Water in clinopyroxenes from eclogites of Bixiling and Huangzhen, Daibeishan nad heodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1133~1140 (in Chinese with English abstract).
- Sobolev A V, Chaussidon M. 1996. H₂O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: implications for H₂O storage and recycling in the mantle. *Earth Planet Sci. Lett.*, 137: 45~55.
- Xia Q K, Chen D G, George Rossman, et al. 2000. An important carrier of high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic fluids: nominally anhydrous minerals. *Geological Review*, 46(5): 462~465 (in Chinese with English abstract).
- Xia Q K, Pan Y J, Chen D G, et al. 2001. Structural water in anorthoclase megacrysts from alkalic basalts: FTIR and NMR study. *Acta Petrologica Sinica*, 16: 485~491 (in Chinese with English abstract).
- Xia Q K, Dallai L, Deloule E. 2004. Oxygen and hydrogen isotope heterogeneity of clinopyroxene megacrysts from Nushan Volcano,

- SE China. *Chem. Geol.*, 209: 137~151.
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. 2003. Zircon U-Pb age, element and isotope geochemistry of Mesozoic mafic-ultramafic rocks at Shacun and Jiaoziyan in North Dabie. *Geological Journal of China Universities*, 9: 139~162 (in Chinese).
- Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, Zhang B R, Zhang L, Hu S H. 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chem. Geol.*, 186: 281~299.
- Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Reviews*, 62: 105~161.

Water in Feldspar from Gabbros at Shacun, Dabie Mountains and Implications for Magmatic Evolution

HAO Yantao, XIA Qunke, DING Qiang, YANG Xiaozhi, YU Huimin, SHENG Yinming
*CAS Key Laboratory of Crust—Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026*

Abstract

Chemical compositions of gabbros from Shacun, Dabieshan and their feldspars are obtained by the wet method and EMPA respectively, and hydrogen speciation and structural water content of feldspars are investigated by FTIR. According to the chemical compositions, the 10 studied gabbros can be divided into two groups representing two different magmas. All analyzed feldspar grains contain structural water which occur as OH^- , and the water contents (H_2O wt. %) range from 135~658 ppm. Combining the results with the dataset of UHP eclogites from Dabieshan, the high H_2O character of the Shacun gabbros suggests that the subducted eclogites could be involved in the source. For both groups of gabbros, the water contents of the feldspars show negative correlation with the $\text{Mg}^\#$ values of the whole rocks. It may be caused by the continual crystallization of amphiboles and/or magma degassing. The preservation of the correlation between water contents in feldspars and $\text{Mg}^\#$ values of the whole rocks indicates that the initial water contents of feldspars have not been changed after crystallization, suggesting their validity of tracing magma evolution.

Key words: structural water; FTIR; feldspar; gabbro; Shacun; Dabieshan