

文章编号: 1000- 6524 (2002) 04- 0387- 11

集宁群和迁西群麻粒岩相变质流体的特征和成因

卢良兆, 董永胜, 周喜文

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘 要: 矿物中流体包裹体研究和脱水反应热力学计算结果表明, 集宁群和迁西群麻粒岩相变质峰期流体均富碳质, $x(\text{CO}_2 + \text{CH}_4)$ 一般为 70% ~ 80%, $x(\text{H}_2\text{O}) \approx 10\% \sim 20\%$, 密度一般为 1.0 ~ 1.1 g/cm³。集宁群中变质流体的成分和 H₂O 活度在空间上分布不均匀, 明显受岩性控制。富铝片麻岩、黑云紫苏片麻岩和基性麻粒岩中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值分别为 0.10 ~ 0.20、0.20 ~ 0.40 和 0.40 ~ 0.60, 表明其非外源成因, 未曾在岩石中均匀渗透, 而可能与进变质过程原岩中普遍存在的有机质氧化和各种脱挥发分反应有关, 其富碳质还与 H₂O 相对易于逸散有关。迁西群变质峰期流体成分在空间上分布均匀, 不受岩性控制, 在太平寨等地区上述 3 类岩石中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值主要都在 0.13 ~ 0.25 之间, $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 0.1 ~ 0.2, 反映流体似为外源成因, 并确曾在岩石中均匀渗透。本区存在幔源基性岩浆底侵的地质条件, 这种富碳质流体可能与它们结晶时析出的 CO₂ 流上升有关。

关键词: 流体包裹体; H₂O 活度; 碳质变质; 集宁群; 迁西群

中图分类号: P588.346; P588.34

文献标识码: A

A comparative study on characteristics and origin of fluids during granulite facies metamorphism of Jining Group and Qianxi Group

LU Liang_zhao, DONG Yong_sheng and ZHOU Xi_wen

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, 130061, China)

Abstract: According to data of fluid inclusions within minerals and thermochemical estimation of dehydration reaction during granulite facies metamorphism of Jining Group and Qianxi Group, the fluids existent at the peak stage must have been carbonic, with $x(\text{CO}_2 + \text{CH}_4) \approx 70\% \sim 80\%$ and $x(\text{H}_2\text{O}) \approx 10\% \sim 20\%$, the density is generally 1.0 ~ 1.1 g/cm³. In the Jining Group, components of the metamorphic fluids and activity of H₂O seem to have been spatially inhomogeneous, and were apparently controlled by lithology. The $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ values of Al-rich

收稿日期: 2002- 04- 08; 修订日期: 2002- 06- 29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49772144)

作者简介: 卢良兆(1930-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事变质岩石学教学与科研工作。

gneisses, biotite hypersthene gneisses and basic granulites are 0.1~0.2, 0.2~0.4 and 0.4~0.6 respectively. Such inhomogeneity indicates that the fluids might have experienced internal buffering, and did not permeate pervasively through rocks. They were probably developed as a result of various kinds of devolatilization and oxidation of the organic materials (now as crystalline graphite) extensively distributed in rocks, both of which must have occurred at the progressive metamorphic stage. Moreover, H₂O could escape from the system more easily than CO₂, and this might be partly related to their carbonic affinity. On the contrary, the components and physical habits of fluids during metamorphic peak of the Qianxi Group were rather homogeneous in space, being independent to lithology. In Taipingzhai district, for example, the $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ values of rocks of all the three types are 0.13~0.25 with $X_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0.1\sim 0.2$. These features suggest that the fluids in this region were probably of external buffering, and had pervasively permeated through rocks. CO₂ in fluids might mostly have come from underplating mantle source mafic magma and its crystallization process.

Key words: fluid inclusions; activity of H₂O; carbonic metamorphism; Jining Group; Qianxi Group

下地壳流体与麻粒岩相变质作用有密切的成因联系, Newton 等(1980)提出“碳质变质”观点,认为大量以 CO₂ 为主的幔源流体在下地壳呈弥漫状渗透上升,将原来流体中的 H₂O 稀释并向上驱赶,进入上部地壳,结果使下地壳流体中 H₂O 活度大大降低,有利于形成以不含 H₂O 矿物为特征的麻粒岩相组合。这种观点近年受到各种挑战,如 Thompson(1983)认为麻粒岩相变质环境中 H₂O 活度低是因当时岩石中流体含量很低,他称之为“干变质”,是由于深部“脱水熔融”过程中 H₂O 优先进入新生熔体中并被带出。不同观点的产生一定程度上是由于对变质流体各种研究方法的意义认识不同,主要涉及变质岩矿物中流体包裹体能在多大程度上反映当时系统中流体的特征及如何正确研究等问题。近年普遍发现矿物中流体包裹体经常为多世代成因,部分甚至可以不是形成于变质作用过程中。其次,流体包裹体封闭时的形态、体积和组成可受到后期各种作用的改造而有所变化(Hollister *et al.*, 1976; Sterner *et al.*, 1995; Olsen *et al.*, 1994; 董永胜等, 2002),因此不宜单独根据它们来研究变质流体,而必须将其与变质峰期脱 H₂O 和脱 CO₂ 反应的平衡热力学计算、矿物共生分析和地质温压计估算等结合起来,才能获得可信结果。

内蒙古集宁群和冀东迁西群位于我国两个不同类型的较典型麻粒岩相变质地区,其变质地质研究程度较高,本文将按上述思路对这两个地区麻粒岩相变质流体的特征和成因进行对比性研究。

1 集宁群麻粒岩相变质峰期流体的特征

1.1 变质地质背景

内蒙古东南部太古宙高级区中集宁群孔兹岩系占有主要地位,分布于兴和、卓资和集宁一带,主要由含黑云母的夕线石榴浅粒岩、变粒岩及片麻岩组成,普遍含少量晶质石墨,并成大型矿床,另夹一些黑云母紫苏片麻岩、麻粒岩及似层状基性麻粒岩,S型花岗岩广泛发育。

卢良兆等(1996)的研究表明本区孔兹岩系在晚太古代至早元古代末经历了2期5阶段的麻粒岩相变质作用和相应的构造变形作用,第1期变质的高峰阶段在2500Ma左右,其代表性平衡组合为:①Sil+Gt+Bt+Kfs+Pl+Qz+Ilm+Rut+Gp(富铝片麻岩);②Opx+Bt±Gt+Pl±Kfs+Qz+Ilm+Mt(长英质麻粒岩与片麻岩);③Opx+Cpx+Hb+Pl+Ilm(基性麻粒岩)^①。据矿物共生分析和各种地质温压计(主要如Opx-Cpx和Gt-Bt温度计、Gt-Opx温压计和GASP压力计)的大量估算数据判断,本区变质峰期温度为800~850℃,压力为0.9~1.0GPa(卢良兆等,1996),且全区较均匀。

1.2 矿物中变质峰期流体包裹体研究

本区富铝长英质粒状岩石和片麻岩的石英中流体包裹体分布最广,个体直径多数为3~5μm,少数达5~10μm,形态和产状各异,一般都形成于峰期后某阶段,而最典型的变质峰期流体包裹体则主要见于石榴夕线黑云片岩的夕线石中(样品A1-6最典型)。夕线石成半自形针柱状,平行主期片理排列,结构特征反映它们无疑是与Bt、Gt、Kfs等平衡共生的峰期矿物。流体包裹体在其晶内呈面型不均匀分布,与裂隙无关,其个体成六方柱状负晶形(图1a),一般直径为3~5μm,少数达5~10μm。这些特征说明它们是变质峰期夕线石生长时被封闭的变质流体。另在这类岩石的石英中也曾见个别孤立的此类包裹体。18个这类包裹体在Chaixmecca冷热台上显微测温,获得其冰点约为-56.5~-57.7℃,无疑其主要组分为CO₂、CH₄高限为7%~10%(摩尔分数,下同);均一温度多数为-16~-18℃,故室温时均为单相。按Shepherd等(1985)引用的Valakovich和Altunin(1968)图解,流体密度为1.00~1.02g/cm³,最高达1.05g/cm³。其中5个包裹体的激光拉曼探针分析结果列于表1,其特点是碳质(CO₂+CH₄)高达70.7%~89.7%,CH₄含量不稳定(0.3%~18.9%),SO₂也常较高,多数为7.2%~19.3%,这与冷热台测温资料的推算结果基本相符,即它们确为富碳质包裹体,但仍含少量H₂O,一般<10%,且不同样品中含量有所变化。本区孔兹岩系中出现

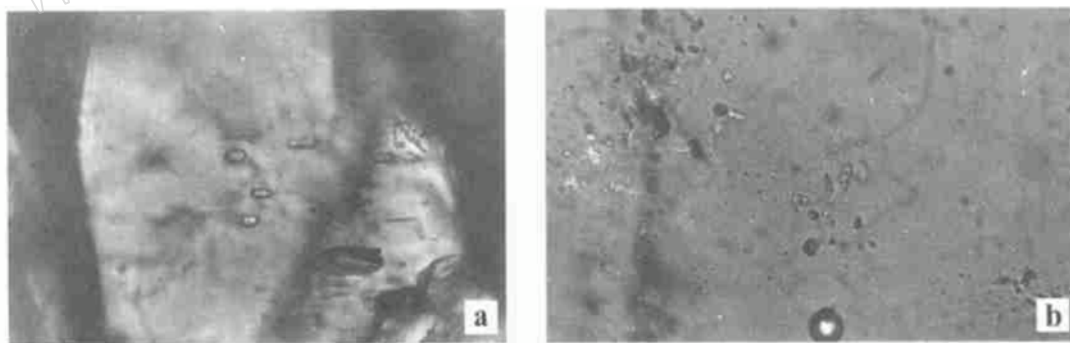


图1 内蒙古集宁群孔兹岩系矿物中流体包裹体照片

Fig. 1 Photos of fluid inclusions in khondalite series of Jining Group

a—夕线石中负晶形变质峰期富碳质流体包裹体,内蒙古兴和地区,A1-6,×300;b—石英中簇状分布的

峰期后H₂O-CO₂两相流体包裹体,内蒙古兴和地区,B1-5,×300

①矿物代号: Akf—碱性长石; Alm—铁铝榴石; Am—角闪石; Bt—黑云母; Cpx—单斜辉石; En—顽火辉石; Gp—石墨; Gt—石榴石; Hb—普通角闪石; Hem—赤铁矿; Ilm—钛铁矿; Kfs—钾长石; Mt—磁铁矿; Opx—斜方辉石; Pl—金云母; Pl—斜长石; Prp—镁铝石; Qz—石英; Rut—金红石; Sil—夕线石; Tr—透闪石。

表 1 集宁群变质峰期流体包裹体的组成

x_B/ %

Table 1 The components of fluid inclusions entrapped during metamorphic peak of Jining Group

样品编号	寄主矿物	H ₂ O	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂ S	SO ₂	SO ₄ ²⁻	HS ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻
Al- 6- 1	Sil		82. 2		7. 5	10. 1			0. 15	0. 05		
Al- 6- 2	Sil	10. 0	81. 2		0. 3	1. 1	7. 2		0. 15	0. 05		
Al- 6- 3	Sil	8. 3	53. 4		18. 9		19. 3		0. 10			
Al- 6- 4	Sil	17. 0	63. 3		7. 4		12. 0		0. 20	0. 10		
Bl- 4- 4	Qz	8. 7	65. 0		11. 6		14. 5		0. 03	0. 17		

由西安地质矿产研究所拉曼探针实验室分析。

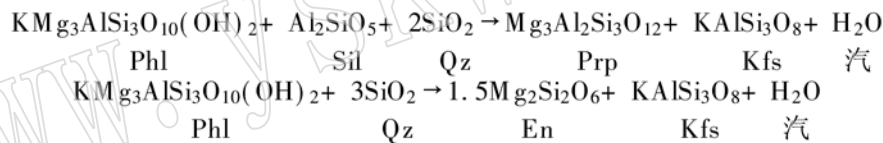
最广泛的是前述石英中形成于峰期后某几个阶段的流体包裹体, 它们为纯 H₂O 或 CO₂ H₂O 含量相似的两相或多相包裹体(图 1b), 其组成和密度都明显不同于峰期包裹体。

1.3 变质峰期流体中 H₂O 活度的平衡热力学计算

当麻粒岩相变质峰期某些脱水反应达到平衡时, 系统中流体相的 H₂O 活度(α_{H_2O})可由以下热力学方程式求得:

$$RT \ln \alpha_{H_2O} = - \Delta_r H_{298, s}^{\circ} + T \Delta S_{298, s}^{\circ} - p \Delta V_{298, s}^{\circ} - RT \ln K_s - G_{H_2O}^{\circ}$$

式中 $\Delta_r H^{\circ}$ 、 $\Delta_r S^{\circ}$ 和 ΔV° 分别代表某一反应的焓、熵和分子体积增量, T 和 p 为平衡时的温、压条件, K_s 为反应涉及的固相项之间的平衡系数, $G_{H_2O}^{\circ}$ 为平衡条件下纯 H₂O 流体的自由能。本区孔兹岩系的峰期矿物组合可由以下两个脱水反应来表达:



应用 Bhattacharya and Sen(1986) 计算所得的有关这两反应的热力学参数和他们引用的有关黑云母、石榴石和斜方辉石等矿物的成分-活度模式及 Fisher and Zen(1971) 的数据库, 再据这两类岩石样品中与计算有关的矿物探针分析结果, 即可计算出各样品所处系统中当时的 α_{H_2O} 值。据前文所述, 计算时设定平衡温度为 800~850 °C, 压力为 0.9 GPa, 计算结果分别列于表 2 和表 3。总的来看, H₂O 活度都很低, 但不同岩石类型中差别明显: 富铝片麻岩和长

表 2 集宁群孔兹岩系中变泥砂质岩变质峰期 H₂O 活度Table 2 The α_{H_2O} value of metapelites in the khondalite series of Jining Group during the metamorphic peak

地区	样品号	α_{Prp}^{Cl}	α_{Phl}^{Bh}	$\ln K_s$	$t/^\circ C$	p/GPa	α_{H_2O}	X_{H_2O}
兴和	A8- 6	0.074	0.142	- 0.875	810	0.9	0.125	0.087
	A10- 4	0.036	0.089	- 1.128	810	0.9	0.161	0.112
	B1- 4	0.060	0.124	- 0.949	810	0.9	0.135	0.094
	C7- 2	0.080	0.204	- 1.159	800	0.9	0.150	0.105
卓资 (羊圈湾)	C7- 12	0.071	0.188	- 1.197	800	0.9	0.155	0.109
	C7- 13	0.063	0.174	- 1.239	800	0.9	0.162	0.113
	P8- 1	0.072	0.149	- 0.950	800	0.9	0.122	0.085
	P4- 1	0.041	0.125	- 1.338	800	0.9	0.179	0.125
	P310- 1	0.053	0.147	- 1.243	800	0.9	0.163	0.114
	P24- 2	0.087	0.177	- 0.933	800	0.9	0.120	0.084
卓资 (大什字)	C1- 3	0.016	0.048	- 1.322	840	0.9	0.264	0.177
	C2- 2	0.056	0.167	- 1.136	840	0.9	0.218	0.146

α_{Phl}^{Bh} 应用 Bohlen 等(1980)的成分-活度模式, 转引自 Bhattacharya and Sen (1986); $\ln K_s = \ln (\alpha_{Phl}^{Bh} \times 0.8) / (\alpha_{Prp}^{Cl})$, 设 α_{En}^{Al} = 0.8。

表3 集宁群孔兹岩系中黑云紫苏片麻岩-麻粒岩的变质峰期 H₂O 活度Table 3 The $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ value of biotite hypersthene gneiss- granulite from the khondalite series of

Jining Group during the metamorphic peak							
样品号	$\alpha_{\text{En}}^{\text{Opx}}$	$\alpha_{\text{Pht}}^{\text{Bt}}$	lnK, s	$t/^\circ\text{C}$	p/GPa	$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$	$X_{\text{H}_2\text{O}}$
A8-5	0.284	0.054	0.520	840*	0.90	0.217	0.146
B1-7	0.314	0.107	-0.013	780*	0.90	0.200	0.144
P099-2	0.183	0.086	-0.605	784*	0.90	0.403	0.288
P191-(1)	0.351	0.161	-0.255	817*	0.90	0.353	0.243

$\alpha_{\text{En}}^{\text{Opx}}$ 的成分-活度模式转引自 Bhattacharyya and Sen (1986); $\ln K, s = \ln[(\alpha_{\text{Pht}}^{\text{Bt}})^{1.5} \cdot (\alpha_{\text{Kfs}}^{\text{Alf}}) / (\alpha_{\text{Pht}}^{\text{Bt}})]$, 设 $\alpha_{\text{Kfs}}^{\text{Alf}} = 0.60$; * 温度引自卢良兆等(1996)。

英质变粒岩中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 一般在 0.10~0.20 之间, 黑云紫苏片麻岩和麻粒岩中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0.2\sim 0.4$, $X_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0.15\sim 0.25$ 。另据基性麻粒岩中 $\text{Hb} = 2\text{Cpx} + 3\text{Opx} + \text{Qz} + \text{H}_2\text{O}$ 这一反应关系, 应用方程式 $\Delta\mu + RT \ln \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + RT \ln \alpha_{\text{SiO}_2}^{\text{Qz}} = 0$ 对两个样品计算, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为 0.391 和 0.561。前文流体包裹体研究已证实本区峰期流体组成以碳质 ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$) 为主, 同时含少量 H_2O (表 1), 这与以上 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 的计算结果完全吻合。

2 迁西群麻粒岩相变质峰期流体的特征

2.1 变质地质背景

冀东是典型的太古宙高级区, 迁西群为其主要组成部分。研究区位于迁西太平寨、金厂峪至迁安姜子山一带, 主要由 TTG 系列长英质片麻岩组成, 中夹极次要的变质表壳岩, 其中包括辉闪黑云片麻岩和麻粒岩、石榴黑云变粒岩、夕线石榴黑云二长片麻岩、似层状中基性麻粒岩、石榴斜长辉石岩及各种角闪质岩石, 其次还有较普遍的磁铁石英岩夹层、若干紫苏花岗岩和钾质花岗岩及较广泛的变质基性岩墙。一般认为这套变质杂岩形成于中、晚太古代(贺高品等, 1991), 主要经历了三幕变形和变质作用, 其 pTt 轨迹为逆时针形。本区迁西群有大量地质温压计数据, 一般认为变质峰期温度为 750~850 $^\circ\text{C}$, 压力为 0.8~1.0 GPa^①, 麻粒岩相区内温压条件在空间上变化不大。

2.2 变质峰期流体包裹体特征

本区变质岩中流体包裹体较普遍, 以石英中最丰富, 也见于石榴石中, 并在夕线石榴黑云片麻岩的变质峰期夕线石针柱状晶体中普遍发现流体包裹体。按形态和产状, 这些流体包裹体可分为数类, 少数孤立或簇状分布, 六边形柱状负晶形, 长轴与夕线石的 c 轴平行, 其形成显然与 Si1 晶体生长同时(图 2); 多数则成浑圆形, 大小混杂, 簇状不均匀分布, 但与矿物解理和(001)粗裂纹无空间关系, 说明其形成可能稍晚于前一类, 但大体仍与夕线石同时, 属于变质峰期阶段。据冷热台测温, 这些包裹体的冰点多数在 -56.8~ -57.4 $^\circ\text{C}$ 之间, 少数低于 -58~ -59 $^\circ\text{C}$, 推断其组成应为纯 CO_2 或 $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ 占极大优势。拉曼探针分析结果

① 卢良兆等, 1995. 华北陆台早前寒武纪变质地质动力学与构造变形研究. 地矿部“八五”重点基础地质研究项目成果报告书. 长春地质学院, 11~25.



图2 迁西群夕线石中变质峰期负晶形碳质流体包裹体照片

Fig. 2 Microphotograph of carbonic fluid inclusions with negative crystal form enclosed in sillimanite of Qianxi Group during metamorphic peak
冀东, 太平寨地区, (T12), $\times 300$

(表4)与此完全符合,大多数包裹体中 $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 > 80\%$,属于富碳质流体相,但一般仍含 H_2O 10%~15%,有些还含 SO_2 或 H_2S 。同时在黑云紫苏二长片麻岩的石英中也曾发现这种变质峰期富碳质包裹体[表4中 Q18-11 和 J06-(3)-1]。这些流体包裹体中 CO_2 的均一温度多数在 $-28 \sim -22^\circ\text{C}$ 之间,有些更低,达 $-39 \sim -56.4^\circ\text{C}$,按有关图解 (Shepherd *et al.*, 1985) 判断,其密度应大于等于 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2.3 变质峰期流体中的 H_2O 活度

本区迁西群虽主要由 TTG 系列长英质片麻岩组成,但仍有表壳岩夕线石榴黑云二长片麻岩、黑云紫苏片

表4 迁西群变质峰期流体包裹体的成分

Table 4 Components of fluid inclusions of Qianxi Group during metamorphic peak

样品编号	寄主矿物	液相 (x wt %)					盐水溶液 (mol/L)				
		CO_2	H_2S	CH_4	SO_2	H_2O	HS^-	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
T08-(1)-1	夕线石	68.8		18.6		12.6	0.16	3.21			0.22
T11-1(1)-1	夕线石	68.5		15.9		15.6			0.28	0.19	
Q21-(1)-2	夕线石	44.5	21.5	19.7		14.3				0.09	0.22
Q21-(1)-3	夕线石	73.9		12.9		13.2				0.04	0.08
Q21-(1)-5	夕线石	67.3		17.3		15.4				0.21	0.36
Q21-(1)-1	夕线石	61.9	6.5	9.5		22.1				0.12	0.26
T12-(3)-2	夕线石	79.2	7.5	13.3							
T12-(2)-1	夕线石	66.3			16.5	17.2			0.26	0.35	
T12-(1)-1	夕线石	60.1	7.2	6.4	15.2	11.1				0.08	0.21
T12-(3)-3	夕线石	78.7	11.6	9.7							
T12-(4)-1	夕线石	69.1		16.4		14.5	0.36			0.12	
Q18-(1)-1	石英	78.7		8.7		12.6	0.43			0.37	
J06-(3)-1	石英	61.6	7.7	12.6		18.1			0.41	0.37	

由西安地质矿产研究所拉曼探针实验室分析。

麻岩和麻粒岩及角闪二辉麻粒岩等夹层,因此也可采用集宁群中相同的3个脱水反应来估算峰期岩石-流体系统中 H_2O 的活度,获得的3类岩石中的峰期 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 值列于表5。 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值主要都在 0.13~0.25 之间, $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 值在 0.1~0.2 之间,且与拉曼探针结果(表4)基本吻合。

表 5 迁西群变质峰期水活度和含量的计算
Table 5 Calculation of a_{H_2O} and X_{H_2O} for peak metamorphism of Qianxi Group

岩类	样品号	a_{Pl}^{Gt}	a_{Phl}^{Bt}	a_{Kfs}^{Aklf}	lnK, s	t/ °C	p/ GPa	a_{H_2O}	X_{H_2O}
I	T08	0.070	0.273	0.915	- 1.451	790	0.9	0.181	0.127
	T11- 1	0.074	0.092	0.562	- 0.794	790	0.9	0.094	0.066
	T12	0.077	0.221	0.884	- 1.178	790	0.9	0.138	0.097
	Q19	0.057	0.333	0.877	- 1.896	780	0.9	0.253	0.177
	Q21	0.043	0.169	0.718	- 1.700	780	0.9	0.208	0.146
	Q22	0.043	0.248	0.888	- 1.871	780	0.9	0.247	0.173
	Q23	0.054	0.313	0.889	- 1.875	780	0.9	0.248	0.174
	Q24	0.041	0.231	0.875	- 1.862	780	0.9	0.245	0.172
II		a_{En}^{Opx}	a_{Phl}^{Bt}	a_{Kfs}^{Aklf}	lnK, s	t/ °C	p/ GPa	a_{H_2O}	X_{H_2O}
	T14	0.299	0.204	0.884	- 0.343	790	0.9	0.309	0.216
	T15	0.287	0.132	0.952	+ 0.103	790	0.9	0.198	0.139
J05	0.353	0.201	0.939	- 0.020	790	0.9	0.224	0.157	
III		a_{Di}^{Cpx}	a_{En}^{Opx}	a_{Tr}^{Am}	lnK _D	t/ °C	p/ GPa	a_{H_2O}	X_{H_2O}
	T05	0.575	0.293	9.372×10^{-4}	4.024	790	0.9	0.132	0.093
	T08	0.543	0.294	2.199×10^{-4}	5.360	790	0.9	0.035	0.025
Q33	0.575	0.381	2.618×10^{-3}	3.391	790	0.9	0.243	0.170	

探针分析单位: 长春科技大学中心实验室; I 一夕线石榴黑云二长片麻岩; II 一紫苏黑云片麻岩- 麻粒岩; III 一角闪二辉麻粒岩; 样品产地: T 一太平寨地区; J 一金厂峪地区; Q 一娄子山地区; a_{Pl}^{Gt} 和 a_{Phl}^{Bt} 的计算方法及 K, s 的公式同表 2~ 3; a_{Kfs}^{Aklf} 计算据 stormer (1975), a_{Di}^{Cpx} 和 a_{En}^{Opx} 的计算据 Wood and Banno (1973), a_{Tr}^{Am} 的计算据 Triboulet and Audren(1988), $lnK_D = ln[(a_{En}^{Opx})^2 \cdot (a_{Di}^{Cpx})^{1.5} / a_{Tr}^{Am}]$ 。

3 两地区变质峰期流体特征和成因讨论

3.1 两地区变质峰期流体的特征

集宁群和迁西群岩石中流体包裹体主要都赋存于石英中, 有一部分成细脉状贯穿晶体分布, 可能是沿后期裂隙贯入, 与变质作用无成因联系, 但有相当一部分成簇状分布于晶体内部, 少数还具石英的负晶形, 显然是在变质作用过程中石英重结晶同时所封闭。本次又在两地区富铝片麻岩的夕线石中普遍发现变质峰期流体包裹体, 据冷热台显微测温资料和拉曼探针分析结果(表 1、表 4), 两地区这一阶段的包裹体均以富碳质(CO₂+ CH₄ 一般为 70%~ 80%)为特征, H₂O 含量一般为 10%~ 20%。另据两地区富铝片麻岩中峰期脱水反应的平衡热力学计算结果, 当时系统中的 a_{H_2O} 和 X_{H_2O} 值大多数在 0.1~ 0.2 之间(表 2、表 5), 这与流体包裹体的研究结果完全吻合。以上结果表明两地区麻粒岩相变质峰期岩石系统中确都存在相当数量的富碳质(以 CO₂ 为主)的流体相, 而并非 Thompson 等(1983)所想像的那样属于完全无流体的“干变质”。其次, 还发现同一样品, 甚至同一夕线石中, 形态相似的同世代不同流体包裹体个体的 H₂O/(CO₂+ CH₄) 比值常有一定差别(表 1、表 4), 这说明它们的成分在封闭后还可能有所改变。Sternner 等(1995)的研究发现流体包裹体中 H₂O 通过其周围外壁矿物中的超显微裂隙向外泄漏的速度远远大于 CO₂, 且包裹体愈大, 这种效应也越大, 结果可将原来 H₂O/(CO₂+ CH₄) 值均匀的流体相变得愈来愈不均匀, 且愈富碳质。本区情况可能与此相似。

3.2 两地区变质流体组成的空间变化规律及流体运移方式

前文已述及,目前对麻粒岩相变质流体主要移运方式和来源有不同认识。集宁群中变质峰期 H_2O 活度虽总体很低,但仍有较大变化范围,同在富铝片麻岩中, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 最低值 0.12 和最高值 0.264 相差一倍以上(表 2),相应的 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 值也变化于 0.084~0.177 之间。值得注意的是,不仅不同地段的 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值可有较大变化,如大什字一带此值高达 0.218~0.264,而且同一地段内也存在不规则变化,如羊圈湾地段 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值即变化于 0.12~0.179 之间。尤其是同一地区不同变质岩类型的 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值差异更明显,孔兹岩系中成夹层的黑云紫苏片麻岩和麻粒岩中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值在 0.20~0.403 之间,明显高于周围的富铝片麻岩,后者 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值多数在 0.12~0.18 之间,基性麻粒岩中的 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值更高,达 0.40~0.56。这些特征表明该区变质流体的组成在空间上不均匀,较明显地受变质岩岩石类型的控制,因此只能认为它们当时可能不是外部缓冲的开放系统,也不是均匀地以弥漫式渗透方式运移,相反这些流体具有岩石系统内部缓冲和不均匀运移的迹象。此外,笔者等最近进行的氧同位素初步研究表明,在花山地区 7 个相距很近的石英白云母大理岩中, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\%)$ 值不规则地变化于 17.0~23.0 之间(另文讨论),这也进一步证明当时不存在能使它们均匀化的弥漫状渗透的流体相。冀东太平寨、金厂峪至迁安娄子山一带的迁西群麻粒岩相变质峰期流体中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ (和 $X_{\text{H}_2\text{O}}$) 总体也较低(表 5),但不同于集宁群之处是该区这些数值具有较高的均匀性。首先,三大类不同岩石中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值变化范围相似,多数都在 0.1~0.25 之间,相应的 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 0.1~0.2。其次,同一地区同类岩石中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值更为均匀,如娄子山地区 5 个富铝片麻岩样品(Q19、Q21~24)中 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值均在 0.21~0.25 之间;但与距离较远的太平寨地区相比,则有所不同,后者的 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值大致在 0.1~0.2 之间。另一方面前述各地段变质峰期流体包裹体分析数据(表 5)也表明其组成在空间上变化较集宁群均匀,除个别例外,一般 CO_2 占 60%~70%, CH_4 和 H_2O 都在 10%~20% 左右,据均一温度估算的压力也较均匀,一般为 1.0~1.1 g/cm³。以上情况说明迁西群变质峰期流体可能符合外部缓冲和弥漫状渗透方式运移的特征。

3.3 两地区变质峰期富碳质流体成因的对比性探讨

以上讨论表明集宁群的变质流体不像是大量从深部上升并均匀加入至下地壳岩石中,但也不像是后者本身脱水熔融而产生,因本区的麻粒岩相变质作用发生于太古宙末至早元古代之间,而目前分布最广的 S 型花岗质岩浆活动无疑是在其后期 1800~1900 Ma 出现的(卢良兆等,1996)。当然在麻粒岩相变质过程中确也有不太强烈的花岗质岩浆作用,但分布很不均匀。本文计算变质峰期 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 等的样品均经严格挑选,取于未受这种影响的细均粒变晶结构的夕线石榴变粒岩、片麻岩和各种麻粒岩中,因此按其中有关矿物的化学成分计算所得的 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 值及其空间变化特征主要不应与这些岩浆作用相联系。

相反,值得注意的是本区孔兹岩系中普遍含少量(1%~3%)晶质石墨鳞片,黄土窑地区还有大型晶质石墨矿,它们由有机沉积物变质而成(卢良兆等,1996)。本区富铝片麻岩中普遍存在 Gt-Sil-Oz-Ilm 组合。据这些矿物的化学成分计算所得的变质峰期氧逸度(f_{O_2})见表 6(卢良兆等,1999)。它们总体较低, $\log f_{\text{O}_2}$ 在 -13~-14 之间,由图 3 可知当峰期温度达 800℃左右时,有些 f_{O_2} 较高的岩石中部分有机碳质可经反应形成 CO_2 。这导致 f_{O_2} 降低,此时如有剩余有机质则将重结晶成石墨。表 6 前 3 个样品 f_{O_2} 相对较高,有机质含量低,它

们能全部转化成 CO₂, 所以目前岩石中不含石墨。样品 C7- 2 中 f_{O_2} 相对较低, 有机质除转化为 CO₂ 外, 部分重结晶成石墨留在岩石中。另在样品 B1- 4 的钛铁矿 (Ilm) 中不含赤铁矿 (Hem) 端员, 说明 $f_{O_2} \approx 0$, 故有机质不能氧化, 绝大部分重结晶成石墨, 所以其中石墨的含量高达 10% 左右。上述特征和图 3 的推断较吻合, 所以这种途径可能是本区变质流体中 CO₂ 的主要来源。此外孔兹岩系中还含一些大理岩和钙硅酸盐变质岩, 在北部花山至三岔口一带占一定地位, 当由碳酸盐和泥灰质原岩经脱碳反应变质成这些岩石时也必析出一定量 CO₂。但同时必须指出, 大量泥砂质原岩在进变质过程经脱水反应必还析出一定量 H₂O 加入流体之中。由于下地壳高温条件下岩石渗透率很低, 流体在其中只能是半开放系统, 所以它们的总成分, 特别是 H₂O/CO₂ 比值主要决定于: ①通

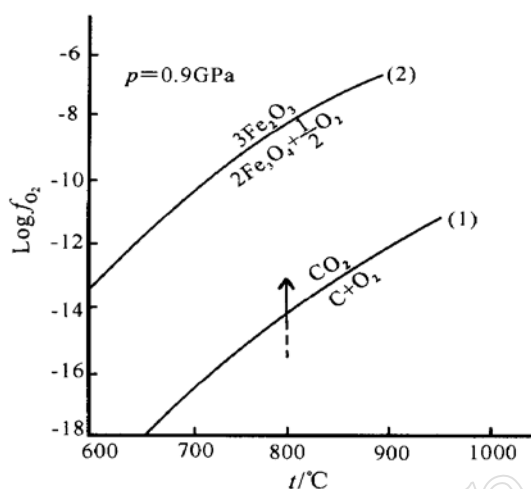


图 3 $\log f_{O_2} - t$ 图解、氧化-还原反应曲线

Fig. 3 $\log f_{O_2} - t$ diagram and oxidation-reduction curves

(1) $C + O_2 \rightarrow CO_2$; (2) $2Fe_3O_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow 3Fe_2O_3$; 箭头为本区 f_{O_2} 变化范围

表 6 集宁群富铝片麻岩变质峰期的氧逸度

Table 6 The f_{O_2} values of Al-rich gneiss during metamorphic peak of Jining Group

样品号	α_{Ilm}^{Hem}	α_{Ilm}^{Grt}	$\text{Log}(\alpha_{Ilm}^{Hem})^3 / (\alpha_{Ilm}^{Grt})^2$	$\text{Log } f_{O_2}$	晶质石墨体积含量 (%)
A10- 4	0.052	0.420	- 3.108	- 14.12	无
C7- 13	0.107	0.371	- 2.049	- 13.42	无
C7- 12	0.066	0.350	- 2.623	- 13.83	无
C7- 2	0.013	0.340	- 4.720	- 15.20	2~ 3

过前述各种途径形成 CO₂ 和 H₂O 的相对量; ②两者同时通过矿物裂隙和岩石裂隙等通道离开原地岩石系统的相对速度。这些复杂的因素使它们的组成在空间上不均匀, 特别是明显受岩性控制。其次据 Storer 等(1995)的研究, 已证明流体中 H₂O(或 H⁺) 通过超显微裂隙逸散的速度明显高于 CO₂, 这对造成峰期流体富碳质也有很大作用。

冀东迁西群麻粒岩相变质峰期流体也富碳质, 其组分与集宁群相似, 但以同一地区内不同岩石类型中 H₂O 活度和其他主要组分含量都相当均匀为特征, 说明它们不是局部岩性或岩石内部脱水反应所控制。另一方面本区麻粒岩系以 TTG 系列正片麻岩占绝对优势, 没有碳酸盐表壳岩夹层, 少量泥砂质和火山沉积岩夹层中也不含石墨, CO₂ 不可能来自杂岩系内部。考虑到本区广泛发育成层状的幔源太古宙基性变质岩和岩墙(贺高品, 1991), 说明当时存在幔源基性岩浆底侵和地壳垂向增生的地球动力学过程^①, 这些岩浆结晶时析出的 CO₂

① 卢良兆等, 1995, 华北陆台早前寒武纪变质地质动力学与构造变形研究。地矿部“八五”重点基础地质研究项目成果报告书。长春地质学院, 11~ 25。

流上升, 在地下壳中弥漫性渗透, 使原来岩石- 流体系统中 H_2O 被稀释, 活度不断降低, 有利于变质峰期不含 H_2O 矿物相稳定平衡共生。

4 结 论

通过以上两地区的研究, 获得如下初步结论:

(1) 麻粒岩相变质岩中流体包裹体的形成具有多期性, 在研究区只有赋存于变质峰期结晶的夕线石和石榴石中的自形(负晶形)流体包裹体才能代表当时岩石系统中流体的组成和密度等特征, 而大量存在于石英等矿物中的流体包裹体则一般为变质峰期后某阶段所成, 或与变质作用无关。

(2) 两地区变质峰期岩石中均存在富碳质流体, 其组成以 CO_2 为主, 有一些 CH_4 , 两者多占 70%~80%, H_2O 含量一般为 10%~20%, 常有少量 SO_2 或 H_2S , 其密度一般为 1.0~1.1 g/cm^3 。脱水反应平衡热力学计算结果的 H_2O 活度在 0.1~0.2 之间, 两者完全吻合。

(3) 内蒙古集宁群变质峰期流体中碳质(CO_2+CH_4)和 H_2O 相对含量在各地段不均匀, 并明显受岩性控制, 富铝片麻岩、黑云紫苏片麻岩和基性麻粒岩中分别为 0.10~0.2、0.2~0.4 和 0.40~0.6, 表明当时不存在大量成分始终固定的外来碳质流体, 并在岩石中弥漫状渗透。该区富碳质流体可能是变质过程中原岩中普遍存在的有机质(现为石墨)的氧化作用及碳酸盐原岩的脱碳反应所析出。

(4) 冀东太平寨等地的麻粒岩相岩石中变质流体的组成相当均匀, 同一地段前述 3 类不同岩石中 CO_2+CH_4 均大于 80%, 而 H_2O 为 10%~20%, 反映它们均受成分固定的外源 CO_2 流所控制。其次, 该区原岩以 TTG 片麻岩为主, 表壳岩很少, 且不含有机质, 碳酸盐岩也极少, 说明富碳质流体的来源与其无关。相反, 该区存在幔源基性岩浆底侵的地质条件, 所以富碳质流体可能与这类岩浆冷却结晶时析出的 CO_2 流上升有关。

总之, 研究表明下地壳麻粒岩相变质时富碳质流体的成因及其运移方式均不能简单地以 Newton 等(1980)的“碳质变质”观点来解释, 可能在不同大地构造背景和地壳岩石系统中具有不同的变质流体成因模式, 并值得进一步深入研究。

Reference

- Bhattacharya A and Sen S K. 1986. Granulite metamorphism, fluid buffering, and dehydration melting in the Madras charnockite and metapelites [J]. *Jour. Petrol.*, 27(5): 1119~1141.
- Dong Yongsheng, Lu Liangzhao. 2002. A method for estimating activity of CO_2 in metamorphic fluids of carbonate rocks — Exemplified by marble of Jining Group in Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(3): 256~271.
- Fish J R and Zen E. 1971. Thermochemical calculations from hydrothermal phase equilibrium data and the free energy of H_2O [J]. *American Jour. Sci.*, 273: 297~314.
- He Gaopin, Lu Liangzhao, Ye Huiwen, *et al.* 1991. The Early Precambrian Metamorphic Evolution of the Eastern Hebei Province and the Southeastern Nei Mongol [M]. Changchun: Jilin University Press, 94~119 (in Chinese).
- Hollister L S and Burruss R C. 1976. Phase equilibria in fluid inclusions from the Khtada Lake metamorphic Complex [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40: 163~175.

- Lu Liangzhao, Dong Yongsheng and Zhou Xiwen. 1999. The activity of H_2O , fugacity of O_2 and variation of their chemical potential during metamorphic peak of the Archaean Khondalite series from Xinghe- Zhuozi district, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 493~ 504 (in Chinese with English abstract).
- Lu Liangzhao, Xu Xuechun and Liu Fulai. 1996. The Early Precambrian Khondalite Series in the North China [M]. Changchun: Changchun Publication House, 16~ 68 (in Chinese).
- Newton R C, Smith J V and Windley B F. 1980. Carbonic metamorphism, granulites and crustal growth[J]. *Nature*, 288: 45 ~ 49.
- Olsen S N and Ferry J M. 1994. A comparative fluid inclusion study of the Waterville and Sangerville Formations, South- Central Maine [J]. *Contr. Mineral. Petrol.*, 188: 396~ 413.
- Shepherd T J, Rankin A H and Alderton D H M. 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies [M]. London: Blackie & Son Limited, 39~ 86.
- Sterner S M, Hall D L and Keppler H. 1995. Compositional re-equilibration of fluid inclusions in quartz [J]. *Contr. Mineral. Petrol.*, 119: 1~ 15.
- Stormer J C. A practical two_feldspar geothermometer [J]. *Am. Mineral.*, 1975, 60: 667~ 674.
- Thompson A B. 1983. Fluid-absent metamorphism [J]. *Jour. Geol. Soc.*, 40: 533~ 547.
- Triboulet C I and Audren C I. 1988. Controls on P - T - t deformation path from amphibole zonation during progressive metamorphism of basic rocks (estuary of the River Vilaine, South Brittany, France) [J]. *Jour. Meta. Geol.*, 6: 117~ 133.
- Wood B J and Banno S. Garnet- orthopyroxene and orthopyroxene- clinopyroxene relationship in simple and complex systems [J]. *Contr. Mineral. Petrol.*, 1973, 42: 109~ 124.

附中文参考文献

- 董永胜, 卢良兆. 2002. 碳酸盐岩石变质流体中 CO_2 活度的估算方法——以内蒙古集宁群大理岩为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 21(3): 265~ 271.
- 贺高品, 卢良兆, 叶慧文, 等. 1991. 冀东和内蒙古东南部早前寒武纪变质作用演化[M]. 长春: 吉林大学出版社, 94~ 119.
- 卢良兆, 董永胜, 周喜文. 1999. 内蒙古兴和- 卓资太古宙孔兹岩系变质峰期水活度、氧逸度及其化学位变化[J]. *岩石学报*, 15(4): 493~ 504.
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系[M]. 长春: 长春出版社, 16~ 68.