

东秦岭松树沟超镁铁质岩中辉石巨晶的成因和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义*

陈丹玲¹ 刘良¹ 周鼎武¹ 罗金海¹ 桑海清²

CHEN DanLing¹, LIU Liang¹, ZHOU DingWu¹, LUO JinHai¹ and SANG HaiQing²

1. 西北大学地质系, 西安 710069

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2001-09-24 收稿, 2002-04-12 改回.

Chen DL, Liu L, Zhou DW, Luo JH and Sang HQ. 2002. Genesis and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of clinopyroxene megacrysts in ultramafic terrain from Songshugou, east Qinling Mountain and its geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 355-362

Abstract Based on the systematic electron microprobe analyses and the compared research with the clinopyroxene megacrysts in mantle rock inclusions and the clinopyroxene in high pressure-ultrahigh pressure metamorphic ultramafic rocks, the pyroxene megacrysts, occurred in ultramafic terrane from Songshugou, eastern Qinling, show the features of metamorphic genesis pyroxene. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating with the high K_2O sample gets the high temperature panel age of 833.8 ± 4.3 Ma, isochron age of 848.2 ± 4.3 Ma. Considering the closed temperature of pyroxene (600°C) is obviously lower than that of the deformation and metamorphism of Songshugou ultramafic terrane at primarily ($\geq 800^\circ\text{C}$), but is very close to the temperature of deformation and metamorphism in amphibolite facies at late stage ($\leq 750^\circ\text{C}$), the panel age of 833.8 ± 2.3 Ma doesn't represent the forming age of the pyroxene megacrysts at peak metamorphism, it may be the lifting and cooling age of high-pressure metamorphic rocks after subduction and collision. Within the error range, the age of pyroxene megacrysts is generally coherent with the metamorphism age (983 ± 140 Ma) obtained from the metamorphites in ophiolite. These indicate that the pieces of Songshugou ophiolite once as a whole underwent subduction downward to the low crust, experienced the high-pressure metamorphism at this level, and then uplifted.

Key words Pyroxene megacryst, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age, Songshugou, Eastern Qinling

摘要 对东秦岭松树沟蛇绿岩残片中超镁铁质岩中的辉石巨晶化学成分的系统研究,表明其具有高压变质成因的特点;采用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法得其高温坪年龄为 833.8 ± 4 Ma,等时线年龄为 848.2 ± 4 Ma。考虑到辉石对Ar的封闭温度(620°C)明显低于该岩片早期塑性变形变质温度($\geq 800^\circ\text{C}$),因此该年龄不代表形成辉石巨晶的峰期高压变质时代,而代表了该岩体变质后初始抬升的冷却事件。这一年龄值与区内蛇绿岩中的镁铁质变质岩获得的变质年龄(983 ± 140 Ma)在误差范围内大体一致,暗示松树沟蛇绿岩片可能整体经历了俯冲至下地壳深度遭受高压变质后再抬升的地质演化过程。

关键词 辉石巨晶; Ar-Ar 年龄; 松树沟; 东秦岭

中图法分类号 P597.3; P588.346

陕西商南县松树沟一带出露东秦岭规模最大的超镁铁质岩体,它与围岩(镁铁质岩)共同构成了秦岭区唯一较少争议的蛇绿岩残片(张国伟等,1993;张本仁等,1998;周鼎武等,1995;裴先治等,1995),因此,其成因、形成时代与构造背

景在秦岭造山带研究中具有重要意义,并长期受到普遍关注(安三元等,1981;黄月华,1984;李曙光等,1991;董云鹏等,1997a;孙卫东等,1997;宋述光等,1998;张国伟等,2001)。但迄今为止,对该岩体成因演化机制的看法仍有分

* 国家自然科学基金重点项目(140032010)、国家自然科学基金(49672141)、陕西省自然科学基金、陕西省教育厅专项基金项目和西北大学校内基金的研究成果。

第一作者简介:陈丹玲,女,1967年10月生,硕士,副教授,主要从事矿物、岩石地球化学工作, E-mail: dlchen@nwwu.edu.cn

歧,尤其是对其形成时代的认识均间接来自围岩—深变质镁铁质岩的年龄信息(李曙光等,1991;董云鹏等,1997b),缺少直接的同位素年代学证据。本文首次对该岩体中的辉石巨晶进行了矿物成因和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年代学研究,以期对该岩体的性质和形成时代提供进一步的矿物学证据及直接的年代学约束。

1 岩体产状与岩石组合特征

松树沟超镁铁质岩体出露于商丹缝合线北侧北秦岭构造带的南部边缘,总体形态呈北西向展布的透镜状构造岩片,长约27km,宽约2km,其长轴与区域构造走向基本一致。目前多数研究者认为,该岩体与区内深变质镁铁质岩呈构造叠置关系共同构成一强烈变形变质的蛇绿岩片(周鼎武等,1995;裴先治等,1996;张国伟,2001)。这些镁铁质岩石以斜长角闪质或角闪质糜棱岩为主,夹含有角闪岩相退变质的高压基性麻粒岩或石榴单斜辉石岩残块(刘良等,1994;董云鹏等,1997a)。超镁铁质岩体主要组成岩石为细粒纯橄岩(约占75%~80%),中粗粒纯橄岩、方辉橄榄岩、透辉橄榄岩、橄榄透辉岩等(占15%~20%)。野外地质特征和室内显微构造研究表明,细粒纯橄岩是经历了多期强烈变形变质改造的橄榄质糜棱岩,发育强变形的透入性新生片理;而中粗粒橄榄岩和辉橄岩等多呈大小不等的透镜体状岩块分布在橄榄质糜棱岩中,显示弱变形的组构特征(周鼎武等,1995;董云鹏等,1997a)。关于二者之间的关系,不少研究者认为细粒橄榄质糜棱岩和部分方辉橄榄岩是地幔残余岩石或洋壳蛇绿岩底部的变质橄榄岩,而中粗粒橄榄岩与辉橄岩是上地幔-下地壳结晶岩石或蛇绿岩的堆晶杂岩(董云鹏等,1996,1997a;张泽军等,1992)。新近,宋述光等(1998)根据显微构造特征分析,认为区内超镁铁质岩体经历了麻粒岩相($\geq 800\text{C}$)条件下的早期塑性变形,伴随晚期韧性剪切作用又发生了角闪岩相($T \geq 750\text{C}$ 和 $P \leq 0.8\text{GPa}$)和绿片岩相条件下的连续的退变质作用的改造,进而提出,其中的中粗粒橄榄岩等是经强烈糜棱岩化改造形成细粒橄榄质糜棱岩之后的残余构造块体。值得注意的是,这一温压条件与围岩高压基性麻粒岩早期变质温度(826~887C)和高角闪岩相退变质的温压条件(650~750C和0.75~1.10GPa)(刘良等,1995)相当,暗示区内超镁铁质岩体与深变质镁铁质岩石经历了大致相同的变质演化过程。

2 辉石巨晶的化学成分

辉石巨晶采自岩体南侧小松树沟地区的中粗粒透辉橄榄岩与橄榄透辉岩中,其大小从约10cm×5cm到5mm×5mm(沿c轴方向)不等。在镜下,辉石巨晶与岩体不同部位、不同岩石类型超镁铁质岩中的其它细粒单斜辉石(粒径<2mm)一样均呈绿黑色,玻璃光泽,短柱状,未见明显变形,

部分辉石巨晶核部铁质出溶物沿解理分布而呈网状,但不见地幔橄榄岩包体单斜辉石巨晶中普遍可见的玻璃质和富镍金属矿物包体(周新民等,1982)。区内代表性辉石巨晶和超镁铁质岩中细粒单斜辉石的电子探针分析结果见表1。为了对比,表1还列出了中国东部沿海和安徽女山新生代玄武岩中地幔橄榄岩包体中的辉石巨晶以及苏鲁-大别等地高压-超高压变质超镁铁岩-石榴石橄榄岩中单斜辉石的化学组成。

从表1可以看出,区内辉石巨晶的化学成分显示较高的 SiO_2 (53.46%~55.16%), CaO (23.16%~25.46%)和 MgO (17.18%~18.02%)含量以及较低的 Al_2O_3 (0.10%~1.62%), TiO_2 (0.00%~0.06%), FeO (0.97%~2.25%) Fe_2O_3 (0.00%~0.70%),均属透辉石(图1)。另外,从表1和图1中可以看出,辉石巨晶的化学组成与区内超镁铁质岩中的细粒单斜辉石的十分接近,指示它们形成条件及成因上的一致性。

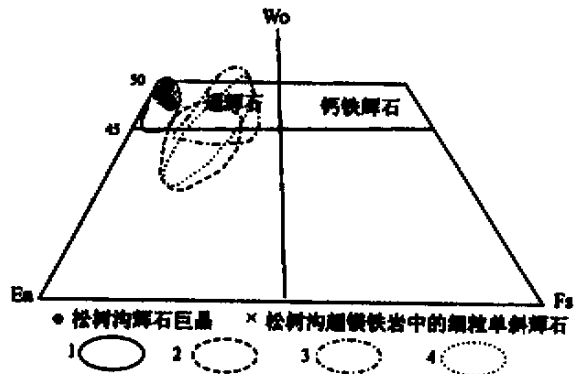


图1 单斜辉石的成分及分类

1-变质超镁铁岩样品(Van *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2000; Cong *et al.*, 1996; Yang *et al.*, 2000); 2-我国东南沿海样品(张儒媛等,1987); 3-法国中央地体样品(Loitard *et al.*, 1988); 4-安徽女山样品(陈道公等1997)

Fig. 1 The composition of the pyroxene megacrysts

已有研究表明,利用单斜辉石中的 Al_2O_3 和 TiO_2 含量可以区分其成因(张儒媛等,1992),本区辉石巨晶明显较低的 Al_2O_3 和 TiO_2 含量显示了变质成因辉石的普遍特征。另外,我们对中国东南沿海(周新民等,1982)及安徽女山(陈道公等,1997)46件新生代地幔橄榄岩包体中辉石巨晶成分统计(表1)后发现,来自地幔橄榄岩中的辉石巨晶显示明显具有低硅(SiO_2 48.64%~50.26%)、低镁(MgO 10.88%~15.44%)、低钙(CaO 15.17%~18.59%)和富铝(Al_2O_3 7.45%~9.00%)、富钛(0.94%~1.17%)、富铁(Fe_2O_3 1.74%~2.33%, FeO 5.68%~7.38%)的特征,而且主要元素之间存在明显的线性关系(图2),说明它们是从岩浆熔体中晶出的(周新民,1982),因而显示出岩浆成因单斜辉石

表1 辉石的电子探针分析结果

Table 1 Microprobe analyses of the pyroxene megacrysts from Songshugou, Shangnan county

	松树沟单斜辉石巨晶*						松树沟超镁铁岩中的单斜辉石*						幔源包体中的辉石巨晶				高压-超高压变质超镁铁岩中的单斜辉石					
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		大松树沟	腰子洼	下土坳	安徽女山 ¹⁾	福建 ²⁾	浙江 ²⁾	安徽 ²⁾	江苏 ²⁾	Norway ³⁾	Chijiadian ⁴⁾	Dabie-Sulu ⁵⁾	Su-Lu ⁶⁾				
SiO ₂	54.51	55.09	54.61	55.16	54.12	54.07	53.46	55.59	54.78	54.40	53.64	52.55	49.85	49.80	50.26	48.74	48.64	54.82	55.94	54.81	54.73	
TiO ₂	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.13	0.19	1.17	1.08	0.94	0.95	0.98	0.16	0.04	0.06	0.04	
Al ₂ O ₃	0.70	0.31	0.89	0.10	0.58	0.86	1.62	0.06	0.65	0.40	1.47	3.02	7.67	8.30	7.45	9.00	8.89	2.80	1.46	1.40	1.46	
Cr ₂ O ₃	0.60	0.19	0.52	0.00	0.43	0.42	0.64	0.07	0.39	0.10	0.39	0.63		0.03	0.03	0.02	0.00	0.61	0.92	0.24	1.43	
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.70	0.13	0.24	0.53	0.04	0.00	1.16		2.00	1.74	2.33	2.10					
MgO	17.65	17.92	17.38	18.02	17.34	17.50	17.18	18.55	17.86	17.32	16.94	16.84	12.88	15.44	14.99	14.46	14.32	16.45	16.61	16.90	16.22	
CaO	23.48	24.04	23.50	25.46	23.21	23.79	23.16	24.75	24.08	23.74	24.24	22.75	18.59	15.17	16.32	16.57	16.69	21.94	20.82	23.70	22.24	
MnO	0.14	0.13	0.17	0.02	0.13	0.02	0.18	0.02	0.10	0.16	0.08	0.20	0.19	0.14	0.14	0.06	0.19	0.00	0.07	0.07	0.04	
FeO	2.20	2.09	2.30	0.97	2.07	1.33	2.25	1.20	1.66	2.68	2.34	1.79	7.38	5.68	5.78	5.91	6.14	0.93	2.71	1.93	2.03	
NiO	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.05	0.07	0.03	0.05	0.01	0.02		0.05	0.00	0.04	0.00	0.05	1.70		1.81	
Na ₂ O	0.20	0.14	0.19	0.05	0.26	0.32	0.25	0.08	0.19	0.18	0.04	0.40	1.02	1.73	1.78	1.70	1.38	1.49	0.01	0.77	0.01	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.04	0.01	0.00	0.00	0.11	0.23	0.07	0.03	0.02				0.03	
Σ	99.55	99.93	99.60	99.89	98.17	99.08	99.00	100.6	100.3	99.08	99.28	99.55	98.86	99.65	99.5	99.74	99.35	99.25	100.2	99.88	100.0	
O	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Si	1.986	1.998	1.988	1.998	1.997	1.978	1.962	1.998	1.981	1.996	1.964	1.919	1.848	1.821	1.848	1.790	1.794	1.983	2.011	1.996	1.987	
Ti	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.004	0.005	0.031	0.028	0.026	0.026	0.027	0.005	0.001	0.000	0.000	
Al ^{IV}	0.014	0.002	0.012	0.002	0.003	0.022	0.038	0.002	0.019	0.004	0.036	0.081	0.335	0.179	0.157	0.210	0.206	0.017		0.004	0.013	
Al ^{VI}	0.016	0.011	0.026	0.004	0.022	0.014	0.032	0.001	0.009	0.014	0.027	0.049	0.183	0.179	0.165	0.179	0.180	0.103	0.062	0.055	0.050	
Cr	0.017	0.005	0.015	0.000	0.013	0.012	0.019	0.002	0.011	0.003	0.011	0.018		0.001	0.001	0.001	0.00	0.002	0.026	0.006	0.042	
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.003	0.00	0.019	0.004	0.007	0.014	0.001	0.000	0.032		0.055	0.048	0.065	0.058		0.021			
Fe ²⁺	0.067	0.064	0.070	0.029	0.064	0.041	0.069	0.036	0.050	0.082	0.072	0.055	0.243	0.174	0.177	0.181	0.189	0.028	0.061	0.060	0.062	
Mn	0.004	0.004	0.005	0.001	0.004	0.001	0.006	0.001	0.003	0.005	0.003	0.006	0.006	0.004	0.004	0.002	0.006	0.00	0.002	0.000	0.000	
Mg	0.959	0.969	0.943	0.973	0.954	0.954	0.940	0.994	0.963	0.947	0.925	0.916	0.711	0.841	0.818	0.791	0.786	0.887	0.890	0.913	0.877	
Ca	0.917	0.934	0.917	0.988	0.918	0.932	0.910	0.953	0.933	0.933	0.951	0.890	0.738	0.594	0.641	0.652	0.660	0.850	0.802	0.920	0.865	
Na	0.015	0.010	0.014	0.004	0.018	0.023	0.018	0.006	0.014	0.013	0.003	0.028	0.074	0.122	0.127	0.121	0.099	0.105	0.118	0.054	0.127	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.005	0.012	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.031	0.031	

* 为本文的电子探针分析结果,在中国科学院地质研究所采用 CAMECA-SX51 仪完成,测定人:徐平; 1) 据陈道公等(1997)数据平均; 2) 据周新民等(1982)数据平均;

3) 据 Van Roermund *et al.* (2000)数据平均; 4) 据 Cong Bolin(1996)数据平均; 5) 据 Zhang Y R *et al.* (2000)数据平均; 6) 据 Yang J J *et al.* (2000)数据平均

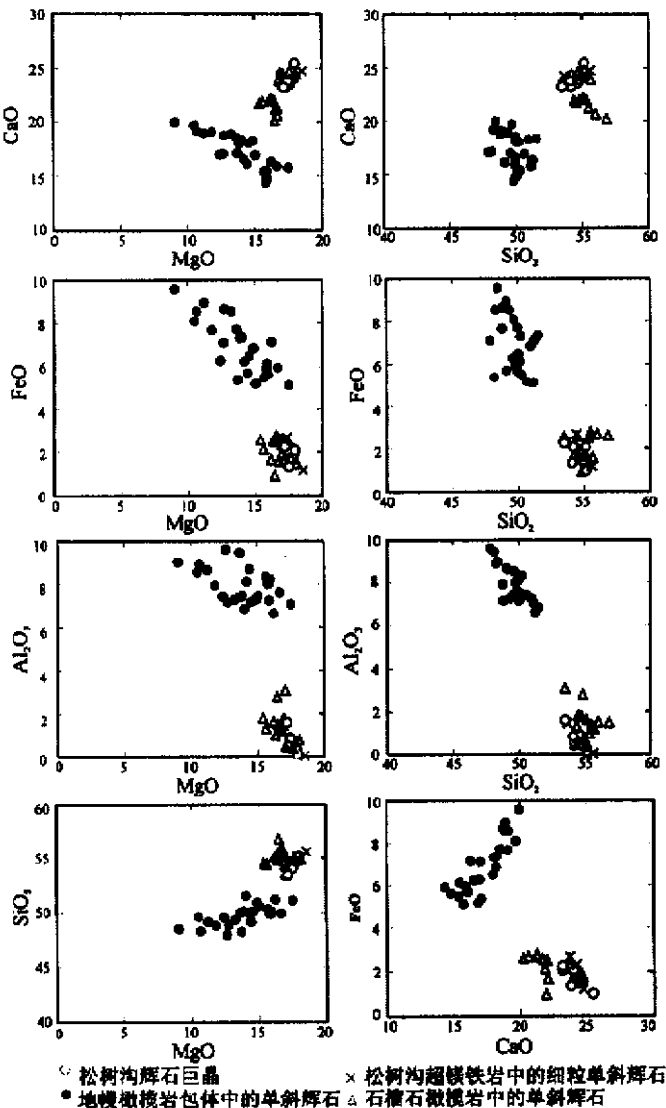


图2 单斜辉石主元素相关图

Fig. 2 Correlative diagram of major element in clinopyroxene

的成分特点。而松树沟辉石巨晶明显不具有该成分特点,在图1,2中两者聚集在不同的区域,显示不同的演化趋势。

若将松树沟辉石巨晶与高压-超高压变质超镁铁岩石-石榴石橄榄岩中的单斜辉石相比(表1,图1,2),发现两者极为相似,后者的 SiO_2 介于54.73%~55.99%; MgO 16.45%~16.90%; CaO 21.94%~23.70%; Al_2O_3 0.04%~0.16%; TiO_2 0.04%~0.10%; FeO 1.93%~2.71%,它们在图1,2中聚集在相同的区域,并显示相同的变化特征,指示它们可能是在相同或相似的变质温压条件下形成的。石榴石橄榄岩是高压-超高压变质作用的产物,松树沟超镁铁岩体经历了早期麻粒岩相的变质变形(宋述光等,1998),而且在松树沟透辉石橄榄岩中可见到斜方辉石(张泽军,1995),这种透辉石与斜方辉石共生的组合也可以是高温高压(如

810°C,15GPa)变质成因的产物(Spear,1993)。综上所述,可以认为松树沟超镁铁岩中的单斜辉石巨晶是高压变质作用的产物。

3 辉石巨晶的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄

3.1 实验方法

由于区内辉石含K量很低,为了获得可用于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定的辉石样品,我们首先选择岩体中辉石巨晶较大、变形最弱的样品,分别制成探针薄片并用电子探针仪挑选其中钾含量最高的样品(样号P4);再仔细选取其中央部分,以玛瑙研钵粗磨后在双目镜下仔细挑出不含杂质、透明度好的颗粒作为测年对象。然后,将样品和用于K, Ca, Cl诱发Ar同位素校正的 K_2SO_4 , CaF_2 , KCl 及标准样品按实验流程分别包装并封入特制反应罐中(桑海清,1994),在中国科学院原子能所49-2核反应堆中进行快中子照射,照射时间为3092 min,其中瞬时中子通量为 $3.44 \times 10^{13} (\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,积分中子通量为 $6.38 \times 10^{18} (\text{n}/\text{cm}^2)$ 。用作中子通量监测的标准样是法国标样B600黑云母,中国标样ZBH-25黑云母,ZBJ角闪石以及国际标样BSP-1角闪石,其年龄值分别为322Ma, $132.7 \pm 1.2\text{Ma}$, $132.8 \pm 1.4\text{Ma}$ 和 $2060 \pm 8\text{Ma}$,照射参数 $J=0.009529$ 。全系统静态热本底为: $^{40}\text{Ar}=1.6 \times 10^{-14} \text{mol}$, $^{36}\text{Ar}=1.2 \times 10^{-16} \text{mol}$, ^{40}Ar 上升率 $0.9 \times 10^{-15} \text{mol}/\text{min}$ 。考虑到辉石的K含量较低,实验前对玻璃Ar提纯系统进行彻底的烘烤去气,烘烤(300°C)12h,抽真空两天,静态真空为 $3.4 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。

数据处理中本底的扣除是按实验之前测得的全系统空白热本底来扣除 ^{36}Ar , ^{37}Ar , ^{38}Ar , ^{39}Ar 和 ^{40}Ar 的。年龄计算所采用的参数是 $^{40}\text{K}=5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$,年龄误差按 1σ 计算。

3.2 实验结果

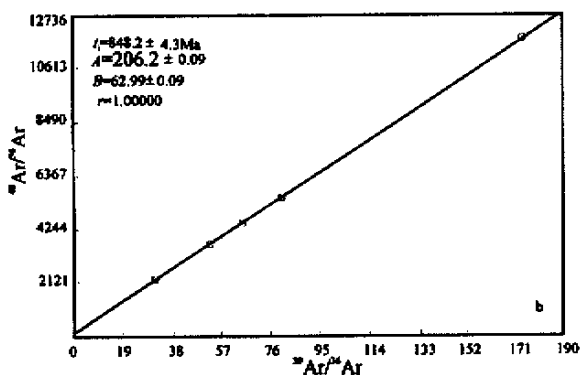
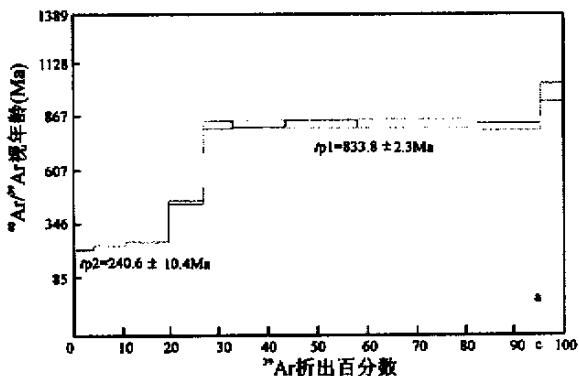
表2给出了松树沟辉石巨晶 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 阶段加热分析同位素数据测定结果,图3是绘制的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱和等时线。图3a表明,该样品在低温阶段和高温阶段各对应着一个坪年龄,并具有不同的意义。年龄谱的最后一个高温阶段(1500°C),由于仪器本底贡献较大,加上 ^{39}Ar 的析出量很少,测量误差较大,给出的视年龄($998.6 \pm 43.2\text{Ma}$)应不具地质意义。

由表2和图3可看出,高温阶段(900~1300°C) ^{39}Ar 析出量占总析出量的68.59%,对应的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 主坪年龄为 $833.8 \pm 2.3 \text{Ma}$,拟合的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时年龄为 $848.2 \pm 4.3 \text{Ma}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比为 206.2 ± 10 。坪年龄谱图形态及坪年龄与等时线年龄值之间良好的一致性,排除了该样品在高温阶段有过剩氩的可能性。虽然样品初始比值(206.2 ± 10)低于尼尔值(295.5 ± 0.5),但该值是在对参加等时线计算的数据进行K, Ca, Cl扣除后,经严格计算得出的。另外,现有研究表明, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比在地质年代中是逐渐增大的,例如:

表 2 辉石巨晶⁴⁰Ar-³⁹Ar 阶段加热分析同位素数据Table 2 Isotopic data of ⁴⁰Ar-³⁹Ar step heating analysis of pyroxene megacryst

加热温度 (C)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	³⁹ Ar _k (10 ⁻¹² mol)	³⁹ Ar _k (%)	⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar _k ±1σ	视年龄 t (Ma±1σ)
430	37.179	0.0812	1.2981	0.1795	0.27	4.44	13.39±0.11	216.66±1.61
600	30.422	0.0542	1.1183	0.1506	0.38	6.31	14.55±0.07	234.29±1.18
700	26.754	0.0373	1.7024	0.1623	0.53	8.66	15.92±0.06	254.84±1.02
800	57.979	0.0984	4.1292	0.2074	0.43	7.13	29.42±0.27	445.87±7.48
900	69.608	0.0327	6.1768	0.2671	0.35	5.79	60.73±0.39	823.70±18.04
1000	65.517	0.0172	9.1944	0.1586	0.67	10.9	61.53±0.34	832.46±16.11
1100	64.805	0.0156	13.939	0.1325	0.88	14.5	61.88±0.34	836.19±15.84
1200	63.338	0.0107	19.294	0.3277	1.50	24.6	62.53±0.32	843.22±15.33
1300	66.176	0.0206	10.026	0.2206	0.78	12.8	61.31±0.35	830.06±16.42
1500	100.08	0.0794	6.4289	0.4524	0.29	4.77	77.59±0.80	998.55±43.18

测试在中国科学院地质与地球物理研究所 Ar-Ar 实验室的 RGA-10 气体质谱计上进行,测定人:桑海清。样品重量 W=0.35g

图 3 辉石巨晶的⁴⁰Ar-³⁹Ar 阶段加热年龄谱(a)及

⁴⁰Ar/³⁶Ar-³⁹Ar/³⁶Ar 等时线(b)

Fig. 3 ⁴⁰Ar-³⁹Ar incremental heating age spectrum (a) and ⁴⁰Ar/³⁶Ar-³⁹Ar/³⁶Ar isochron diagram (b) of pyroxene megacrysts

46 亿年前⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始比小于 1(为 0.7~0.9, Eberhardt *et al.*, 1970), 3.8 亿年前为 291(朱铭等, 1997), 现代为 295.5; 而且不同地质体的⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值也不相同, 例如: 一些火山岩的⁴⁰Ar/³⁶Ar=189~230, 超镁铁包体的⁴⁰Ar/³⁶Ar=295.5~1000, 拉斑玄武岩的⁴⁰Ar/³⁶Ar=1282~11300(Fisher 等, 1982)。因此, 本样品的⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始比略小并不影响所得年龄值的可信度。

低温阶段(400~700℃)³⁹Ar 析出量已达 19.4%, 并呈现出一个较好的年龄坪, 对应的坪年龄为 240.6±10.4Ma, 可能记录了后期构造热事件叠加的影响。

4 讨论

根据⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年原理, 在高温阶段所获得的坪年龄代表了样品早期结晶时代, 亦即辉石发生变质重结晶的时代。结合区内超镁铁质岩体经历麻粒岩相条件下的早期塑性变形以及角闪岩相退变质的研究成果(宋述光等, 1998), 同时考虑到辉石对 Ar 的封闭温度(620℃, 桑海清, 1996)明显低于该岩体早期变形变质温度(≥800℃), 可以认为, 辉石巨晶的⁴⁰Ar/³⁹Ar 高温坪年龄(833.8±2.3)Ma 不代表峰期变质时代, 而可能指示该岩体所代表的洋壳经消减俯冲发生高压变质后初始抬升的冷却年龄, 从而限定该岩体的变质作用发生在新元古代。而低温坪年龄(240.6±10.4Ma), 与秦岭区广泛发育印支期碰撞型花岗岩的时代(为 245~211Ma, 张国伟等, 2001)基本一致, 显然是这一构造热事件的响应。

松树沟蛇绿岩残片主要由超镁铁质岩片与镁铁质岩片组成。董云鹏等(1997b)获得镁铁质岩片中深变质玄武岩 Sm-Nd 全岩等时线年龄为 1036±46Ma, 代表了蛇绿岩的形成年龄; 镁铁质岩片中还残存有早期高压基性麻粒岩和高压变质的石榴角闪岩(榴闪岩)(杨勇等, 1994), 其中石榴石

一角闪石矿物对 Sm-Nd 等时线年龄为 $983 \pm 140\text{Ma}$ (李曙光, 1991), 记录了该岩片的变质年龄 (刘良等, 1995; 董云鹏, 1997b); 超镁铁质岩片早期经历了麻粒岩相的塑性变质变形, 其变质辉石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 高温坪年龄为 $833.8 \pm 2.3\text{Ma}$, 代表了岩体消减俯冲发生高压变质后抬升冷却的地质事件。上述不同岩类、不同方法获得的后两组年龄数据有差异, 除因 (983 ± 140)Ma 年龄值误差较大外, 还可能与矿物封闭温度的不同有关。辉石对 Ar 的封闭温度 (620C , 据桑海清等 1996) 明显低于石榴石-角闪石矿物对对 Sm-Nd 的封闭温度 (750C , 据 Jugoutz *et al* 1988 和 Henson *et al* 1995), 从而导致计时滞后。因此, 可以认为这两组年龄数据在误差范围内大致反映了新元古时期的同一期构造热事件, 暗示构成松树沟蛇绿岩残片中的超镁铁质岩片与镁铁质岩片可能共同经历了俯冲至下地壳深度遭受 (高压) 麻粒岩相变质后再抬升退变质的复杂地质演化过程。

5 结论

(1) 通过首次对松树沟超镁铁质岩中辉石巨晶进行的化学成分的系统研究表明, 其特征与该岩体不同部位、不同岩石类型超镁铁岩中的细粒单斜辉石的成分具有一致性, 尤其是辉石中低 Al_2O_3 和低 TiO_2 的成分特征, 明显不同于国内外岩浆成因的巨晶单斜辉石, 而与苏鲁-大别等地高压-超高压变质超镁铁岩中的单斜辉石极为相似, 表明其形成是高压变质作用的产物。这一认识与本区透辉石橄榄岩中发现透辉石与斜方辉石的共生组合, 以及该岩体早期经历麻粒岩相塑性变质变形的地质事实相吻合。

(2) 采用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化方法, 首次获得松树沟超镁铁岩中辉石巨晶的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 高温坪年龄为 $833.8 \pm 2.3\text{Ma}$, 等时线年龄为 $848.2 \pm 4\text{Ma}$, 二者非常一致。该年龄代表了该超镁铁质岩体发生高压变质后初始抬升的冷却事件, 并与区内镁铁质岩获得的变质年龄 ($983 \pm 140\text{Ma}$) 在误差范围内大体一致, 指示松树沟蛇绿岩片可能整体经历了俯冲至下地壳深度遭受高压变质后再抬升的地质演化过程。

致谢 张国伟院士、张旗研究员审阅了本文初稿并提出了宝贵的修改意见, 西北大学地质系王焰博士在辉石巨晶的挑选及同位素分析中给予很大的帮助, 在此深表谢意。

References

An Sanyuan, Wang Dangrong, Hu Nenggao. 1981. Geological characteristics and genesis of ultramafites in Songshugou area, Shangnan, Shanxi province. *Journal of Xi'an College of Geology*, (2): 9-21 (in Chinese)

Chen Daogong, Xia Qunke, and Zhi Xiachen. 1997. Geochemistry of clinopyroxene megacrysts from Nushan, Anhui. *Acta Miner-*

ologica Sinica, 17(3): 260-269 (in Chinese with English abstract)

Cong Bolin. 1996. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu region of China. Beijing: Science Press, 173-174

Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, and Liu Liang. 1997b. Sm-Nd isotopic ages of the Songshugou ophiolite from the east Qinling and its geological significance. *Regional Geology of China*, 16(2): 217-221 (in Chinese with English abstract)

Dong Yunpeng, Zhou Dingwu and Zhang Guowei. 1997a. The emplacement mechanism and tectonic evolution of ultramafites in Songshugou area, eastern Qinling. *Scientia Geological Sinica*, 32(2): 173-180 (in Chinese with English abstract)

Dong Yunpeng, Zhou Dingwu and Zhang Guowei. 1996. Textures and structures of Songshugou ophiolitic peridotites in east Qinling and their rheological implications. In: Zhang Qi (ed.). *Study on ophiolites and geodynamics*, Beijing: Geological Publishing House, 150-153 (in Chinese with English abstract)

Eberhardt P, Geiss J, Graf H *et al*. 1970. Trapped solar wind noble gases, $^{81}\text{Kr}/\text{Kr}$ exposure ages and K/Ar ages in Apollo 11 lunar material. *Science*, 167:558-560

Fisher D E. 1982. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 29:24-251

Henson B J, Zhou B. 1995. Retention of isotopic memory in garnets partially broken down during an over-printing granulite facies metamorphism; implication for the Sm-Nd closure temperature. *Geology*, 23: 225-228

Huang Yuehua. 1984. The aureoles of the Songshugou Alpine-type Mass. *Geochimica*, (3): 206-216 (in Chinese with English abstract)

Jugoutz E. 1988. Nd and Sr systematics in an eclogite xenolith from Tanzania: evidence for frozen mineral equilibrium in the continental lithosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 1285-1293

Li Shuguang, Chen Yizhi, Zhang Guowei and Zhang Zongqing. 1991. A 1Ga B. P. Alpine peridotite body emplaced into the Qinling Group: evidence for the existence of the late Proterozoic plate tectonics in the north Qinling area. *Geological Review*, 37(3): 235-242 (in Chinese with English abstract)

Liu Liang and Zhou Dingwu. 1994. Discovery and study of high-pressure basic granulites in Songshugou area of Shangnan, East Qinling. *Chinese Science Bulletin*, 39: 1599-1601. (in Chinese)

Liu Liang, Zhou Dingwu, Dong Yunpeng, Zhang Hongfa, Liu Yangjie and Zhang Zejun. 1995. High pressure metabasites and their retrograde metamorphic *P-T-t* path from Songshugou area, eastern Qinling Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 127-136 (in Chinese with English abstract)

Liu Liang, Zhou Dingwu, Wang Yan and Liu Yan. 1996. Protolith properties of garnet-bearing high-pressure metamorphic rocks from Songshugou, east Qinling. *Journal of Northwest Universi-*

- ty, 26: 105—110(in Chinese with English abstract)
- Loitard J M, Briot D, and Boivin P. 1988. Petrological and geochemical relationship between pyroxene megacrysts and associated alkali-basalts from Massif Central(France). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98: 81—90
- Pei Xianzhi, Wang Tao, Li Wuping, Zhang Weiji, Wang Quanqing and Li Guoguang. 1995. The tectonomagmatic evolution in Shangxian-Danfeng area, North Qinling Mountain. *Northwestern Geology*, 16(4): 13—19 (in Chinese)
- Pei Xianzhi, Zhang Weiji and Wang Quanqing. 1996. Geological and geochemical characteristics and their tectonic environment of the Songshugou ophiolite in the north Qinling. In: Zhang Qi (ed.). *Study on ophiolites and geodynamics*, Beijing: Geological Publishing House, 49—52 (in Chinese with English abstract)
- Sang Haiqing, Wang Songshan, Hu Shiling and Qiu Ji. 1994. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating method and Ar isotopic mass spectrometry analysis of quartz. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 15 (2): 17—27 (in Chinese with English abstract)
- Sang Haiqing, Wang Songshan and Qiu Ji. 1996. The ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of pyroxene, hornblende and plagioclase in Taipingzhai granulites in Qianxi county, Hebei province and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 390—400 (in Chinese with English abstract)
- Spear F S. 1993. Metamorphic phase equilibrium and pressure-temperature-time paths. Chelsea, Michigan, U. S. A., 86—90
- Song Shuguang, Suli, Yang Hequn. 1998. Petrogenesis and emplacement of the Songshugou peridotite in Shangnan, Shaanxi. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 212—221 (in Chinese with English abstract)
- Sun Weidong, Zheng Yongfei, Li Shuguang, SunYong and Zhang Guowei. 1997. An oxygen isotope study of contact metamorphic rocks from Songshugou in North Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 162—167 (in Chinese with English abstract)
- Yang Yong, Chen Nengsong, Lu Qi and Zhou Wenyuan. 1994. Characteristics of compositions zoning of garnet and amphibole and metamorphic processes of garnet-amphibole rocks from Songshugou area, Shangnan, Shaanxi province. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 402—414 (in Chinese with English abstract)
- Van Roermund H L M, Drury M R, Barnhoorn A and De Ronde A A. 2000. Super-silicic garnet microstructures from an orogenic garnet peridotite, evidence for an ultra-deep (>6 GPa) origin. *J. Metamor. Geol.*, 18: 135—147
- Yang J J and Jahn B M. 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China. *J. Metamor. Geol.*, 18: 167—180
- Zhang Benren, Han Yinwen, Xu Jifeng and Ouyang Jianping. 1998. Geochemical evidence for north Qinling being a part of Yangtze plate prior to the Neoproterozoic. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 369—382
- Zhang Guowei and Li Shuguang. 1993. Ophiolites in Qinling orogenic belt. Beijing: Geological Publishing House, 13—24 (in Chinese)
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng and Xiao Qinghui. 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics. Beijing: Science Press, 655—682, 706—724
- Zhang Ruyuan and Cong Bolin. 1992. Geothermometer and geobarometer. Beijing: Geological Publishing House, 30 (in Chinese)
- Zhang R Y, Liou J G, Yang J S and Yui T F. 2000. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrain, eastern-central China. *J. Metamor. Geol.*, 18, 149—166
- Zhang Zejun and An Sanyuan. 1992. Element geochemical evidence for the petrogenesis of Songshugou ultramafic rocks. *Geochimica*, (2): 175—181 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Zejun. 1995. The genesis of dunites in the Songshugou ultramafic rock body, North Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (suppl.): 178—189 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Dingwu, Zhang Zejun, Dong Yunpeng and Liu Liang. 1995. Geological and geochemical characteristics on Proterozoic Songshugou ophiolite piece from Shangnan country, Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (suppl.): 154—164 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Xinmin, Chen Tuhua, Liu Changshi and Xue Jiyue. 1982. Pyroxene and amphibole megacrysts in alkalic basaltic rocks from southeastern coastal provinces of China. *Acta Mineralogica Sinica*, 1, 13—20 (in Chinese with English abstract)
- Zhu M, He WG, Zhang FS, Liu Q, Liao YS, Zheng XY and Pan ZJ. 1997. On argon isotope. *Acta Geoscientia Sinica*, 18 (suppl.): 322—324 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 安三元, 王王当荣, 胡能高. 1981. 陕西商南松树沟超镁铁质岩体的地质特征及成因. *西安地质学院院报*, 2: 9—21
- 陈道公, 夏群科, 支霞臣. 1997. 安徽女山单斜辉石巨晶的地球化学. *矿物学报*, 17(3): 260—269
- 董云鹏, 周鼎武, 刘良. 1997. 东秦岭松树沟蛇绿岩 Sm-Nd 同位素年龄的地质意义. *中国区域地质*, 16(2): 217—221
- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟. 1996. 东秦岭松树沟蛇绿岩中地幔橄榄岩的结构构造特征及其流变学意义. 见张旗主编: *蛇绿岩与地球动力学研究*. 地质出版社, 150—153
- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟. 1997. 东秦岭松树沟超镁铁质岩侵位机制及其构造演化. *地质科学*, 32(2): 173—180
- 黄月华. 1984. 松树沟阿尔比斯型超镁铁质岩体的接触变质带. *地球化学*, (3): 206—216
- 李曙光, 陈移之, 张国伟, 张宗清. 1991. 一个距今 10 亿年侵位的阿尔卑斯型橄榄岩体: 北秦岭晚元古代板块构造体制的证据. *地质论评*, 37(3): 235—242
- 刘良, 周鼎武. 1994. 东秦岭商南松树沟高压基性麻粒岩的发现及初步研究. *科学通报*, 39: 1599—1601
- 刘良, 周鼎武, 董云鹏, 张宏法, 刘养杰, 张泽军. 1995. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的 PTt 演化轨迹. *岩石学*

- 报, 11(2): 127—136
- 裴先治, 王涛, 李伍平, 张维吉, 王全庆, 李国光. 1995. 北秦岭商丹地区构造岩浆演化特征. 西北地质, 16(4): 13—19
- 裴先治, 张维吉, 王全庆. 1996. 北秦岭松树沟蛇绿岩的地质地球化学特征及其形成环境. 见张旗主编: 蛇绿岩与地球动力学研究, 158—162
- 桑海清, 王松山, 胡世玲, 裘冀. 1994. 石英的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年方法及Ar同位素质谱分析. 质谱学报, 15(2): 17—27
- 桑海清, 王松山, 裘冀. 1996. 冀东太平寨麻粒岩中的辉石、角闪石、斜长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 岩石学报, 12(3): 390—400
- 宋述光, 苏犁, 杨合群. 1998. 陕西商南松树沟橄榄岩体的成因及侵位机制. 岩石学报, 14(2): 212—221
- 孙卫东, 郑永飞, 李曙光, 孙勇, 张国伟. 1997. 北秦岭松树沟接触变质岩的氧同位素研究. 岩石学报, 13(2): 162—167
- 杨勇, 陈能松, 陆奇, 周文元. 1994. 松树沟榴闪岩中的石榴石和角闪石成分环带特征及岩石变质过程. 岩石学报, 10(4): 402—412
- 张本仁, 韩吟文, 许继锋等. 1998. 北秦岭新元古代前属扬子板块的地球化学证据. 高校地质学报, 4(4): 369—382
- 张国伟, 李曙光. 1993. 秦岭造山带的蛇绿岩. 地质研究, 北京: 地质出版社, 13—24
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 655—682, 706—724
- 张儒媛, 从柏林. 1992. 矿物温度计和压力计. 北京: 地质出版社, 30
- 张泽军, 安三元. 1992. 松树沟超镁铁质岩成因的地球化学证据. 地球化学, (2): 175—181
- 张泽军. 1995. 北秦岭松树沟超镁铁岩中两类不同成因的纯橄岩. 岩石学报, 11(增刊): 178—189
- 周鼎武, 张泽军, 董云鹏, 刘良. 1995. 北秦岭商南松树沟元古宙蛇绿岩片的地质地球化学特征. 岩石学报, 11(增刊): 154—164
- 周新民, 陈图华, 刘昌实, 薛纪越. 1982. 我国东南沿海碱性玄武岩中辉石和角闪石巨晶. 矿物学报, 1, 13—20
- 朱铭, 霍卫国, 张福松, 刘强, 廖永胜, 郑辛英, 潘仲骏. 1997. Ar同位素地质的若干问题. 地球学报, 18(增刊): 322—324