

北大别罗田超高压榴辉岩中峰期变质矿物: 褐帘石和氟磷灰石*

刘贻灿¹, 古晓锋¹, 李曙光¹, 陈振宇²

(1. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026;
2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:对北大别西南部“罗田穹隆”中超高压榴辉岩进行了变质岩石学研究,发现其中含有褐帘石和氟磷灰石。褐帘石主要以包体形式产出于石榴子石中,富含稀土元素,部分已退变为绿帘石;氟磷灰石主要以包体形式产出于石榴子石中或存在于基质中,产出于石榴子石中氟磷灰石具有较高的F含量(~3 wt%),而基质中氟磷灰石大多数具有磁黄铁矿针状出溶体及相对低的F含量(~1 wt%)。根据石榴子石中与褐帘石、氟磷灰石共生的包体矿物组合以及氟磷灰石中较高的F含量,证明它们形成于超高压条件下。由此提出了罗田榴辉岩曾发生超高压变质作用的新证据。

关键词:超高压变质作用;褐帘石;氟磷灰石;榴辉岩;北大别杂岩带

中图分类号:P588.3;P59 文献标识码:A

Allanite and fluor-apatite formed under ultrahigh-pressure conditions from the Luotian eclogites in the North Dabie complex zone

LIU Yi-can¹, GU Xiao-feng¹, LI Shu-guang¹, CHEN Zhen-yu²

(1. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, USTC, Hefei 230026, China;
2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract: Metamorphic petrology of eclogites at Luotian from the southwestern part of the North Dabie complex zone, central China, was studied. It was found that except for usual eclogitic minerals such as garnet, omphacite and rutile, the eclogites contain allanite and fluor-apatite. Allanites are rich in rare earth elements (REE) and occur as inclusion in garnet, and some of them were partly retrograded to epidote. Whereas fluor (F)-apatite occurs as inclusion in garnet or in matrix, the former is rich in F (~3 wt%) without any exsolutions and the latter is relatively poor in F (~1 wt%) associated with the oriented pyrrhotite exsolution. In view of occurrence and assemblage of the coexisting minerals with allanite and fluor-apatite in garnet, it is suggested that they formed at peak stage of ultrahigh-pressure (UHP) metamorphism. These results provide new evidence that UHP metamorphism occurred in the eclogites at the Luotian dome.

Key words: Ultrahigh-pressure metamorphism; allanite; fluor-apatite; eclogite; North Dabie complex zone

* 收稿日期:2007-01-31;修回日期:2007-03-26

基金项目:国家自然科学基金(40572035和40634023)资助。

作者简介:刘贻灿(通讯作者),男,1962生,博士/教授。研究方向:岩石学、岩石地球化学、同位素年代学及大地构造学。

E-mail: liuyc@ustc.edu.cn

0 引言

褐帘石是绿帘石族矿物,是轻稀土(LREE)和Th等元素的重要载体矿物^[1~5],并且常控制俯冲带流体的LREE和Th的含量以及影响着岩石中微量元素的演化(如文献^[5]).大多数榴辉岩是与大陆俯冲作用有关的高级变质岩,绿帘石族矿物是榴辉岩中的常见副矿物^[6].实验和对自然界中样品的研究表明,绿帘石族矿物可在较宽的 p - T 范围内稳定.然而,有关褐帘石和绿帘石在超高压变质条件下的产状却存在较大争议^[7].一般认为超高压岩石中褐帘石是超高压相矿物^[5~9].因此,近年来对褐帘石的研究受到广泛关注.

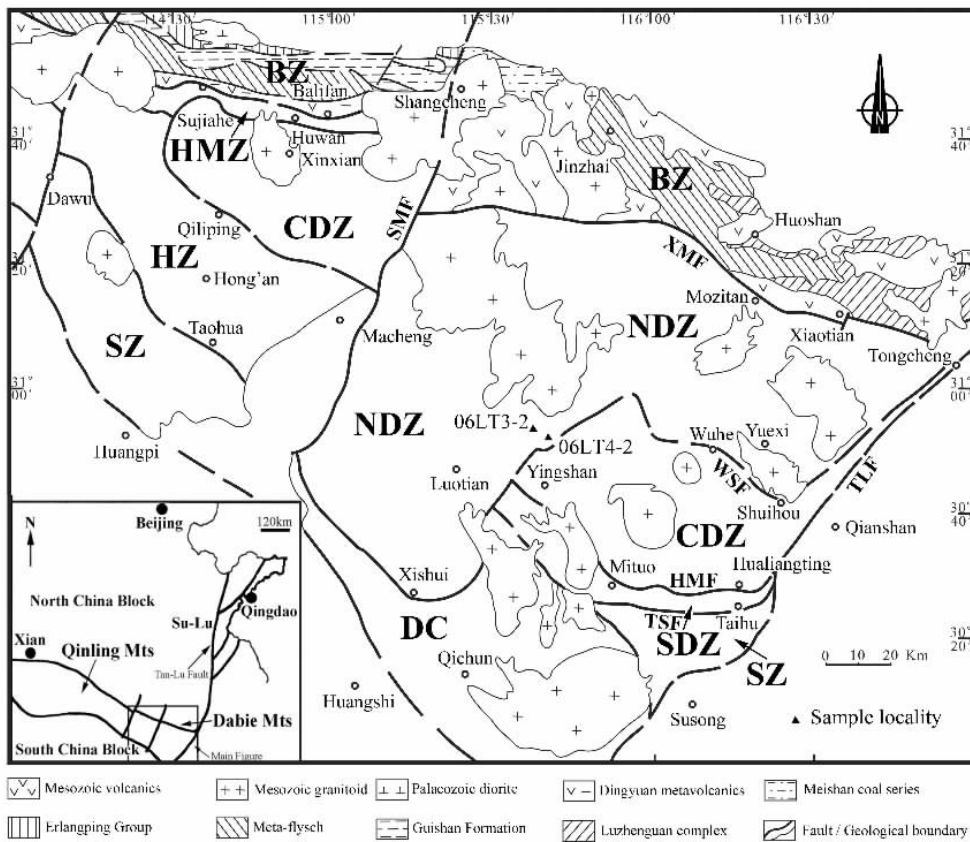
此外,磷灰石也是地壳岩石中常见的副矿物之一,它常常控制着岩石中LREE的浓度^[3]和俯冲带岩石的地球化学行为(如文献^[10]).在变质岩中,磷

灰石稳定范围很宽,从低级变质岩到高级变质岩中都可以存在.因此,它被认为是超高压岩石形成与折返过程的重要见证者^[11].但是,超高压岩石中磷灰石的地球化学行为以及有关变质反应动力学等尚缺乏深入了解.最近,已有学者陆续报道了关于超高压岩石中磷灰石的针状出溶体,并对其成因进行了讨论^[11~14].然而,对其F的含量及与成因的关系等,仍未见有关探讨.

本文对北大别西南部罗田穹隆中超高压榴辉岩进行了岩石学研究,发现了褐帘石和氟磷灰石,证明其为超高压变质阶段的产物.

1 地质背景和样品描述

大别山从南到北,大致可划分为宿松变质带、南大别低温榴辉岩带、中大别超高压变质带、北大别杂岩带及北淮阳带等构造岩石单位(图1).



BZ=Beihuaiyang zone, NDZ=North Dabie complex zone, CDZ=Central Dabie UHP metamorphic zone, SDZ=South Dabie low-T eclogite-facies zone, SZ=Susong metamorphic zone, HMZ=Huwan mélangé zone, HZ=Hong'an low-T eclogite-facies zone, DC=amphibolite-facies Dabie complex, XMF=Xiaotian-Mozitan fault, WSE=Wuhe-Shuihou fault, HMF=Hualiangting-Mituo fault, TSF=Taihu-Shanlong fault, TLF=Tan-Lu fault

图1 大别山造山带的地质简图

Fig. 1 Schematic geologic map of the Dabie orogen

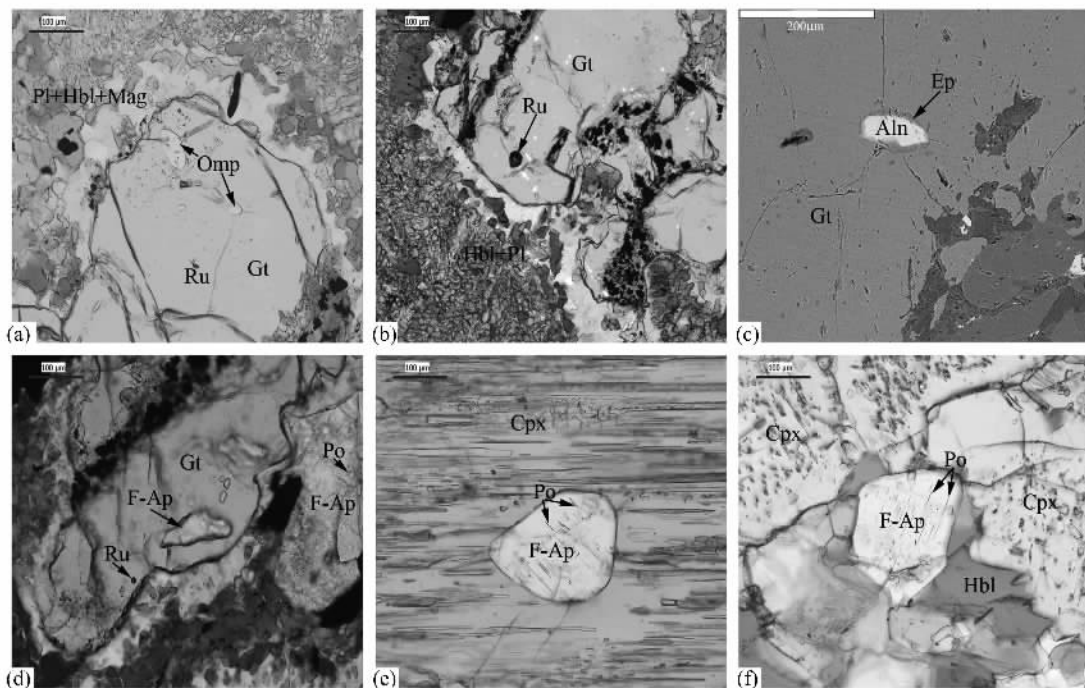
北大别杂岩带, 又称北部杂岩带或北大别带(简称北大别), 大致分布于磨子潭—晓天断裂以南至龙井关—水吼—五河一线以北地区, 其南、北分别为超高压变质带和北淮阳带。该带变质岩的岩石类型主要有条带状花岗片麻岩类(包括英云闪长质片麻岩、花岗闪长质片麻岩及二长花岗质片麻岩)、斜长角闪岩和少量的方辉橄榄岩、纯橄岩、石榴辉石岩、石榴二辉麻粒岩、紫苏磁铁石英岩、榴辉岩、含镁橄榄石和钛斜硅镁石大理岩等, 未变质岩石类型主要有辉石岩、辉长岩、花岗岩类等。该带变质变形强烈, 以角闪岩相区域变质作用为主, 局部保留麻粒岩相和榴辉岩相矿物组合。北部杂岩带西段即罗田及其以北地区(商城—麻城断裂以东), 因以前未发现榴辉岩和局部存在古老的麻粒岩包体(如黄土岭), 且其周围的面理产状一般向外倾斜, 常被称为“罗田穹隆”或“罗田片麻岩穹隆”。1998 年以前因该带未发现榴辉岩等高压变质岩, 它的构造归属曾成为一个有争议的问题。近年来, 北大别东段(安徽境内)榴辉岩^[15,16]和金刚石^[17,18]的发现以及有关变质岩

石学^[19~23]、岩石地球化学^[24]和同位素年代学^[25~28]等方面研究, 证明北大别带也经历了三叠纪超高压变质作用, 属于印支期华南俯冲陆壳的一部分。最近, 作者等在北大别带西段—罗田穹隆中发现镁铁质下地壳岩石俯冲变质成因榴辉岩^[29]。岩石学研究^[18,20,28,29]表明, 该带中榴辉岩经历了榴辉岩相超高压变质及麻粒岩相和角闪岩相退变质作用。

本文研究的样品即为基性麻粒岩转变而成的榴辉岩^[29], 采集自北大别罗田穹隆中(图 1)。其围岩为条带状片麻岩, 主要表现为角闪岩相矿物组合, 偶尔见稀少的高压或超高压变质矿物残留如石榴子石、透辉石、金红石、金刚石等, 证明其也经历过超高压变质作用并与所包裹的榴辉岩具有类似的变质演化过程^[30,31]。

2 岩相学特征

研究区新鲜的榴辉岩主要由石榴子石、绿辉石、金红石等组成, 含少量斜长石、角闪石、透辉石、紫苏辉石、(钛)磁铁矿、石英、褐帘石和磷灰石等(见图 2)。



(a) 石榴子石中绿辉石和金红石包体以及退变质后成合晶; (b) 石榴子石中金红石包体以及退变质后成合晶(角闪石+斜长石+磁铁矿); (c) 石榴子石中褐帘石及其退变质形成的绿帘石包体的背散射电子扫描图像; (d) 石榴子石中氟磷灰石和金红石包体以及基质中具有磁黄铁矿出溶体的氟磷灰石; (e) 具有针状石英出溶体的单斜辉石及其所包裹的具有磁黄铁矿出溶体的氟磷灰石; (f) 具有磁黄铁矿出溶体的氟磷灰石、具有针状矿物出溶体的单斜辉石以及角闪石。其中, Gt-石榴子石, Omp-绿辉石, Ru-金红石, Hbl-角闪石, Pl-斜长石, Aln-褐帘石, Ep-绿帘石, F-Ap-氟磷灰石, Cpx-单斜辉石, Po-磁黄铁矿

图 2 北大别罗田超高压榴辉岩的显微照片

Fig. 2 Micro photographs of the eclogites from the Luotian dome in North Dabie complex zone

代表性矿物的电子探针分析见表 1. 榴辉岩大多退变强烈,石榴子石呈变斑晶,绿辉石呈包体形式存在于石榴子石中(图 2(a))和少量残晶存在于基质中,早期绿辉石大多数因折返初期减压而形成具有针状石英出溶体的晚期绿辉石或钠质透辉石. 以包体形式存在于石榴子石或锆石中早期绿辉石的 Na_2O 含量为 4.75 wt%~6.5 wt% 和硬玉端元组分为 34 mol%~44 mol%, 部分可能因后期减压退变而形成具有较低的 Na_2O 含量(如 2.7 wt%~3 wt%)和硬玉端元组分(如 17 mol%~20 mol%)的钠质透辉石(作为石榴子石包体存在时,主晶石榴子石常伴有放射状裂纹),具有针状石英出溶体的钠质透辉石的硬玉端元组分一般为 5 mol%~10 mol%^[29]. 褐帘石,主要以包体形式存在于石榴子石中(图 2(c)). 磷灰石,有 2 种产出类型:一是以包体形式存在于石榴子石(图 2(d))中但没有出溶结构;二是具有针状出溶体,大多数存在于基质中(图 2(f)),少数以包体形式存在于具有针状石英出溶体的单斜辉石中(图 2(e)),该类也是本文将详细论述的类型.

岩石学研究^[29]表明,“罗田穹隆”中榴辉岩经历了两个重要变质事件即麻粒岩相变质事件和榴辉岩相及其退变质事件. 后者包括榴辉岩相变质、麻粒岩相退变质和角闪岩相退变质等三个阶段. 证明其由镁铁质下地壳岩石(基性麻粒岩)俯冲变质成因. 类似于北大别东段榴辉岩,具有相同的退变质演化过程,都经过了麻粒岩相退变过程,均属于印支期华南俯冲陆壳的一部分,但是,它们不同于南部超高压榴辉岩,二者之间具有不同的 p - T - t 演化、分别属于

华南俯冲下地壳和上地壳^[31,32].

岩石中最特征的退变质显微结构是发育后成合晶和冠状体结构以及针状矿物出溶体结构. 其中,出溶体结构非常普遍,如单斜辉石中石英^[29]或钾长石+钠长石+石英^[33]出溶体、石榴子石中金红石出溶体以及磷灰石中磁黄铁矿出溶体(见后文). 石榴子石和单斜辉石中针状矿物出溶体以及榴辉岩和片麻岩中微粒金刚石的发现,证明北大别带经过了超高压变质作用^[17~19,30,31,33]. 尽管所研究样品中未发现柯石英和金刚石等标志性的超高压矿物,但是,石榴子石中伴随有放射状裂纹的石英包体、单斜辉石中石英出溶体以及石榴子石中金红石+磷灰石+角闪石矿物出溶体等指示罗田榴辉岩经历过高温超高压变质作用^[29,32](刘贻灿等未发表资料),其峰期变质条件为 $T=853-880\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $p=2.5\text{ GPa}$ (根据单斜辉石中石英出溶估算的最小压力^[19])或 $T=900-960\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $p=4.0\text{ GPa}$ (对应于金刚石的最小形成压力^[34]).

3 分析方法

矿物的电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室完成,仪器型号为 JEOL JXA-8800,分析测试条件为 15 kV、电子束 20 nA 和电子束斑约为 1 μm .

4 褐帘石产出特征及氟磷灰石的出溶结构

4.1 褐帘石

以包体形式存在于石榴子石中,部分已退变为

表 1 北大别罗田榴辉岩中氟磷灰石、褐帘石和绿帘石的电子探针分析结果(%)

Tab. 1 Electron microprobe analyses of fluor-apatite, allanite and epidote minerals from the Luotian eclogites in the North Dabie complex (%)

Sample No.		Na_2O	K_2O	MnO	MgO	CaO	FeO	Al_2O_3	TiO_2	Cr_2O_3	SiO_2	
1	06LT3-2	F-Ap	0.06	0.00	0.02	0.08	55.69	0.17	0.01	0.02	0.01	0.00
2	06LT4-2	F-Ap	0.00	0.01	0.00	0.04	54.45	0.37	0.00	0.00	0.01	0.00
3	06LT3-2	Aln	0.01	0.02	0.00	2.02	14.10	8.23	21.46	0.06	0.00	34.39
4	06LT3-2	Ep	0.01	0.00	0.00	0.29	22.20	6.92	27.67	0.12	0.05	38.09
5	06LT3-2	Aln	0.00	0.00	0.00	1.58	15.47	7.63	23.75	0.07	0.00	35.67
Sample No.		P_2O_5	NiO	F	La_2O_3	ThO_2	Ce_2O_3	Pr_2O_3	Nd_2O_3	Total		
1	06LT3-2	F-Ap	41.13	—	1.00	—	—	—	—	98.18		
2	06LT4-2	F-Ap	41.81	—	3.09	—	—	—	—	98.49		
3	06LT3-2	Aln	0.00	0.01	—	5.00	1.24	8.11	0.77	3.40	98.82	
4	06LT3-2	Ep	0.05	0.01	—	0.41	0.03	0.58	0.03	0.39	96.84	
5	06LT3-2	Aln	0.00	0.01	—	3.53	0.60	6.35	0.72	3.32	98.70	

【注】 矿物缩写含义同图 2;“—”表示未分析.

绿帘石,因而表现为核一边结构(图 2(c)). 电子探针分析结果(表 1)表明,褐帘石具有较高的稀土含量,而退变形成的绿帘石则具有相对较低的稀土含量但富 H_2O . 石榴子石中褐帘石包体之所以退变成富含水的绿帘石,可能主要是超高压榴辉岩在折返过程中因减压形成的退变质流体沿石榴子石裂隙渗透而造成褐帘石退变的结果,而退变质形成的绿帘石具有相对低的稀土含量主要是因流体携带出部分稀土元素的缘故. 此外,石榴子石中常含有富 Na 绿辉石(如 6.5 wt%) + 金红石等矿物包体^[29](图 2(a)、(b)、(d)). 因此,褐帘石形成于超高压阶段. 这与前人对东海超高压榴辉岩^[7]以及其他造山带超高压岩石^[5,6,8]中褐帘石研究结果一致. 同时证明,绿帘石形成于退变质阶段,这与北大别黄尾河超高压榴辉岩的实验结果一致,即在高温高压($T=800\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $p=2.5\text{ GPa}$)条件下绿帘石消失^[33].

4.2 氟磷灰石及其出溶结构

电子探针分析结果(表 1)表明,不同产状的磷灰石具有不同的 F 含量. 如,具有针状出溶体的磷灰石含 F 量较低,一般为 1 wt% 左右;而以包体形式存在于石榴子石中者具有较高的 F 含量,一般为 3 wt% 左右. 因此,尽管这些磷灰石均为氟磷灰石,但因后期减压过程中退变质影响程度不同而异. 很明显,分布于基质中、具有针状出溶体的磷灰石已受强烈退变质作用的影响,而分布于石榴子石中的磷灰石因受退变质作用的影响较小而未显示出溶结构和含有较高的 F 含量. Spear and Pyle^[10] 研究结果表明,磷灰石中的 F 含量与变质压力成正比,也就是说,形成压力越高,磷灰石中的 F 含量也越高. 结合石榴子石中所含的富 Na 绿辉石 + 金红石 + 褐帘石等包体组合,证明以包体形式存在于石榴子石中的高 F 含量的氟磷灰石应形成于峰期超高压变质阶段. 而以包体形式存在于具有针状石英出溶体的单斜辉石中氟磷灰石(图 2(e))具有相对低的 F 含量,这与其减压退变质作用有关:一方面,具有针状石英出溶体的单斜辉石主晶是由早期形成于超高压($p>2.5\text{ GPa}$)条件下的超硅绿辉石因减压退变的结果^[19];另一方面,减压退变过程中可能引起其所包裹的高 F 含量的氟磷灰石包体发生出溶并造成低 F 含量(因为以包体形式存在于石榴子石中者具有较高的 F 含量且没有出溶结构). 这进一步证明,高 F 含量的氟磷灰石形成于超高压变质阶段.

氟磷灰石中出溶体的能谱(图 3)指示,出溶体

主要由 Fe 和 S 两种元素组成. 类似于朱永峰等^[12]报道的苏鲁超高压大理岩中磷灰石的磁黄铁矿出溶体成分. 因此,本文研究的氟磷灰石中针状出溶体也应是磁黄铁矿. 这种氟磷灰石中磁黄铁矿出溶体的发现,可能具有两个方面的意义:一是指示其所附存的主矿物(氟磷灰石)形成于还原环境;另一方面,可能指示其主晶矿物形成于较高的压力条件下,并且, F、Fe 和 S 等元素易进入氟磷灰石晶格中,这也许类似于超高压条件下形成的镁铁榴石(Majorite 或 Majoritic garnet)富含 Si、Na、Ti 和 P 等元素^[35]的成因机制. 因此推测在超高压条件下,不同的矿物对不同的元素可能具有不同的富集能力或亲合力.

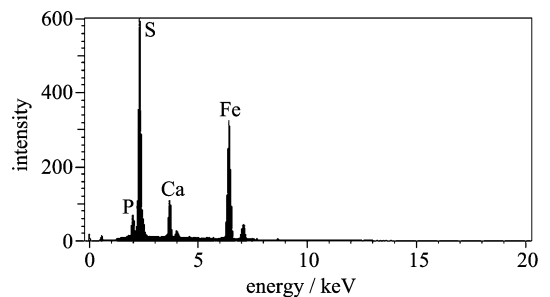


图 3 北大别罗田榴辉岩中氟磷灰石内针状出溶体的能谱曲线

Fig. 3 EDS spectra of needle exsolutions in fluor-apatite from the Luotian eclogite in the North Dabie complex zone

尽管本文未对氟磷灰石进行稀土元素及挥发分分析,但是,前人^[7]对苏鲁造山带超高压榴辉岩研究表明,超高压阶段形成的氟磷灰石富含稀土及挥发分. 因此,北大别罗田榴辉岩超高压阶段形成的褐帘石和氟磷灰石都富含稀土元素和挥发性组分(如 F、Cl 和 S 等),它们随着陆壳深俯冲和俯冲陆壳物质的再循环必将对超高压岩石的退变质过程及再循环物质产生较大影响.

5 结论

(I) 北大别罗田榴辉岩中褐帘石和氟磷灰石形成于超高压变质阶段,而绿帘石形成于退变质阶段.

(II) 褐帘石和氟磷灰石都富含大量轻稀土元素和挥发组分,它们的深入研究,将有助于探讨大陆深俯冲过程中的物理化学条件、流体作用、陆壳物质再循环以及超高压岩石的退变质过程等有关大陆动力学的重大课题.

致谢 衷心感谢两位审稿人对本文提出的建设性修改意见!

参考文献(References)

- [1] Exeley R A. Microprobe studies on REE-rich accessory minerals; implications for Skye granite petrogenesis and REE mobility in hydrothermal systems[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 48: 97-110.
- [2] Brooks C K, Henderson P, Ronsbo J G. Rare-earth partition between allanite and glass in the obsidian of Sandy Braes, Northern Ireland [J]. *Mineral Mag*, 1981, 44: 157-160.
- [3] Gromet L P, Silver L T. Rare earth element distributions among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implications [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1983, 47: 925-940.
- [4] Tribuzio R, Messiga B, Vannucci R, et al. Rare earth element redistribution during high-pressure low-temperature metamorphism in ophiolitic Fe-gabbros (Liguria, northwestern Italy): implications for light REE mobility in subduction zones[J]. *Geology*, 1996, 24: 711-714.
- [5] Hermann J. Allanite: thorium and light rare earth element carrier in subducted crust [J]. *Chem Geol*, 2002, 192: 289-306.
- [6] Enami M, Liou J G, Mattinson C G. Epidote minerals in high P/T metamorphism [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2004, 56: 347-398.
- [7] 王汝成, 王硕, 邱检生, 等. 东海超高压榴辉岩中绿帘石、褐帘石、磷灰石和钍石集合体的电子探针成分和化学定年研究 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(7): 1 855-1 866.
- [8] Nagasaki A, Enami M. Sr-bearing zoisite and epidote in ultra-high pressure (UHP) metamorphic rocks from the Su-Lu province, eastern China: An important Sr reservoir under UHP conditions [J]. *American Mineralogist*, 1998, 83: 240-247.
- [9] Carswell D A, Wilson R N, Zhai M. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China [J]. *Lithos*, 2000, 52: 121-155.
- [10] Spear F S, Pyle J M. Phosphates in metamorphic rocks [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2004, 48: 293-335.
- [11] Hong J A, Li S G, William C M, et al. Needle-like exsolutions from apatite in ultrahigh-pressure eclogite and their genesis [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2003, 23 (3): 273-277.
洪吉安, 李曙光, William C M, 等. 超高压榴辉岩中磷灰石的针状出溶物及其成因 [J]. *矿物学报*, 2003, 23 (3): 273-277.
- [12] 朱永峰, Massonne H J. 磷灰石中磁黄铁矿出溶结构的发现 [J]. *岩石学报*, 2005, 21: 405-410.
- [13] 陈晶, 曾令森, 陈方远, 等. 江苏青龙山磷灰石中出溶体的初步研究 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(7): 1 921-1 926.
- [14] 梁凤华, 曾令森, 陈晶, 等. 胶东荣成榴辉岩中含铜磁黄铁矿出溶结构的磷灰石的发现及其意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(2): 433-438.
- [15] Wei C J, Shan Z, Zhang L, et al. Determination and geological significance of the eclogites from the northern Dabie Mountains, central China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43: 253-256.
- [16] Xu S T, Liu Y C, Su W, et al. Discovery of the eclogite and its petrography in the Northern Dabie Mountain [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 273-278.
- [17] Xu S T, Liu Y C, Chen G, et al. New finding of micro-diamonds in eclogites from Dabie-Sulu region in central-eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48: 988-994.
- [18] Xu S T, Liu Y C, Chen G, et al. Microdiamonds, their classification and tectonic implications for the host eclogites from the Dabie and Su-Lu regions in central eastern China [J]. *Mineralogical Magazine*, 2005, 69: 509-520.
- [19] Tsai C H, Liou J G. Eclogite-facies relics and inferred ultrahigh-pressure metamorphism in the North Dabie complex, central China [J]. *American Mineralogist*, 2000, 85: 1-8.
- [20] Liu Y C, Xu S T, Li S G, et al. Distribution and metamorphic P-T condition of the eclogites from the mafic-ultramafic belt in the northern part of the Dabie Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(3): 385-395.
刘贻灿, 徐树桐, 李曙光, 等. 大别山北部镁铁-超镁铁质岩带中榴辉岩的分布与变质温压条件 [J]. *地质学报*, 2001, 75(3): 385-395.
- [21] Xiao Y, Hoefs J, van den Kerkhof A M, et al. Geochemical constraints of the eclogite and granulite facies metamorphism as recognized in the Raobazhai complex from North Dabie Shan, China [J]. *J Metamorphic Geol*, 2001, 19: 3-19.
- [22] 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 大别山造山带的构造几何学和运动学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002, 1-133.
- [23] Liu Y C, Xu S T, Li S G, et al. Tectonic affinity, T-t path and uplift trajectory of eclogites from northern Dabie Mountains, central-eastern China [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2003, 14: 28-33.

- [24] Liu Y C, Xu S T, Li S G, et al. Eclogites from the northern Dabie Mountains, eastern China: geochemical characteristics, Sr-Nd isotopic compositions and tectonic implications[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(supplement): 178-188.
- [25] Liu Y C, Li S G, Xu S T, et al. U-Pb zircon ages of the eclogite and tonalitic gneiss from the northern Dabie Mountains, China and multi-overgrowths of metamorphic zircons[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(3): 417-423.
刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 等. 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[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 417-423.
- [26] Xie Z, Chen J F, Zhang X, et al. Zircon U-Pb dating of gneiss from Shizhuhe in North Dabie and its geologic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(1): 139-144.
谢智, 陈江峰, 张巽, 等. 大别片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17: 139-144.
- [27] Ge N J, Xia Q K, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb ages of Yanzihe gneiss from northern Dabie, China: evidence for Triassic metamorphism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(3): 513-516.
葛宁洁, 夏群科, 吴元保, 等. 北大别燕子河片麻岩的锆石 U-Pb 年龄: 印支期变质事件的确定[J]. *岩石学报*, 2003, 19(3): 513-516.
- [28] Liu Y C, Li S G, Xu S T, et al. Geochemistry and geochronology of eclogites from the northern Dabie Mountains, central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25: 431-443.
- [29] Liu Y C, Xu S T, Li S G, et al. Eclogite from the subducted lower crust of the Yangtze plate within the Luotian dome and its geological implication[J]. *Earth Sciences-Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(1): 71-77.
刘贻灿, 徐树桐, 李曙光, 等. “罗田穹隆”中的下地壳俯冲成因榴辉岩及其地质意义[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2005, 30(1): 71-77.
- [30] Liu Y C, Li S G, Xu S T, et al. Ultrahigh-pressure metamorphic evidence for gneiss from the northern Dabie complex, central China: message from zircon [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22: 1 827-1 832.
刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 等. 北大别片麻岩的超高压变质证据—来自锆石提供的信息[J]. *岩石学报*, 2006, 22(7): 1 827-1 832.
- [31] Liu Y C, Li S G, Xu S T. Zircon SHRIMP U-Pb dating for gneiss in northern Dabie high *T/P* metamorphic zone, central China: Implication for decoupling within subducted continental crust [J]. *Lithos*, 2007, 96: 170-185.
- [32] Liu Y C, Li S G. Lower crustal rocks from the Dabie Mountains and their deep subduction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(4): 1 059-1 066.
刘贻灿, 李曙光. 大别山下地壳岩石及其深俯冲[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1 059-1 066.
- [33] Malaspina N, Hermann J, Scambelluri M, Compagnoni R. Multistage metasomatism in ultrahigh-pressure mafic rocks from the North Dabie Complex (China)[J]. *Lithos*, 2006, 90: 19-42.
- [34] Xu S T, Okay A I, Ji S, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 1992, 256: 80-82.
- [35] Ye K, Cong B, Ye D. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km[J]. *Nature*, 2000, 407: 734-736.