

榴辉岩相高压-超高压变质岩的 He 同位素 地球化学研究现状与问题

李兆丽 李天福

(大陆构造与动力学国家重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京 100037)

摘要: He 同位素是区分地壳、地幔物质,研究壳-幔相互作用最灵敏的示踪剂之一,但其在高压-超高压变质作用过程中的地球化学行为目前仍不清楚,因而制约其在榴辉岩研究中的应用。中国作为高压-超高压榴辉岩带分布的重要地区,榴辉岩产出得天独厚,大洋、大陆两种俯冲成因榴辉岩均有分布。本文在归纳榴辉岩相高压-超高压变质岩研究进展的基础上,分析了 He 同位素示踪在榴辉岩研究中的应用现状。

关键词: He 同位素;榴辉岩;高压-超高压变质作用

中图分类号: P588.3;P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)04-0909-08

大洋/大陆深俯冲有关的高压-超高压变质作用的研究是近 20 年来国际固体地球科学研究创新思想最活跃、最具突破性的成果之一。1984 年,法国科学家 Smith^[1] 和 Chopin^[2] 分别在西阿尔卑斯 DoraMaira 地块和挪威西片麻岩区的镁铝榴石石英岩和榴辉岩中发现超高压矿物柯石英。随后,在中国大别山地区的榴辉岩^[3]、哈萨克斯坦 Kokchetav 地块的片麻岩和榴辉岩^[4]中也相继发现变质成因的微粒金刚石等超高压矿物。近年来,在欧亚的许多碰撞造山带中也陆续报道含有柯石英或金刚石的超高压变质岩。随着高压-超高压变质作用研究的深入,全球已经发现了 20 余条高压-超高压变质带。这些高压-超高压变质带的发现表明,低密度大陆地壳和洋壳可以被俯冲到 80~120 km 的地幔深度,然后再折返到地表。但是,大洋、大陆物质为什么能俯冲到地球深部?又如何折返地表?这一发现对许多传统的地球动力学理论提出了挑战,成为当今探索地球深部动力学过程的一个重要窗口,在国际上引发了一场高压-超高压和大陆深俯冲作用的研究热潮。

1 高压-超高压变质榴辉岩研究回顾

板块俯冲是壳幔相互作用的重要形式,由此形成的高压-超高压变质岩是示踪壳幔相互作用的最直接对象。目前已发现的榴辉岩相高压-超高压变质岩都产出于不同时代和地质背景的造山带中,是造山带根部重要岩石组成部分,包含有造山带形成和演化的重要信息。在造山带中,主要存在两种类型的榴辉岩,一种类型主要与长英质片麻岩、泥质片麻岩、片岩(变沉积岩)及大理岩等陆壳性质的岩石相伴生,又称为“阿尔卑斯型”榴辉岩,其形成与陆壳的(深)俯冲及陆陆碰撞作用有关^[5],目前报道的高压-超高压变质岩主要属于这种类型;另一种是与蓝片岩和具有洋壳性质的蛇绿岩伴生的榴辉岩,又称为“太平洋型”或“Franciscan”型榴辉岩^[6-9],其形成与洋壳的(深)俯冲作用有关,这种类型相对较少,目前见诸报道的只有吉尔吉斯坦的 Atbashy 地区和哈萨克斯坦的 Makbal 地区^[6]、西阿尔卑斯的 Zermatt-Saas 带^[8]、中国西天山造山带^[9-10],以及最近报道的羌塘中

收稿日期:2011-05-20;改回日期:2011-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40902024)和中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(J0813)资助。

作者简介:李兆丽,女,1976 年生,副研究员,主要从事岩石学与地球化学研究;E-mail:lizhaoli@ccsd.cn。

部^[11]和拉萨地体^[12]地区的榴辉岩。

中国境内的高压-超高压变质带产出得天独厚,地区分布广、规模大,两种类型的榴辉岩均有产出,这在世界各国中都是少有的。除了大别山地区发现的超高压变质岩带^[13-17],中国境内发现的高压超高压变质带还有柴北缘超高压变质带^[18]、南阿尔金超高压变质带^[9,19-20]、东秦岭超高压变质带^[21-22]、南天山超高压变质带^[9-10,23]、北祁连山高压变质带^[24-25]、北阿尔金高压变质带^[26]、甘肃北山^[27-28]、华北古陆块北缘中段^[29]、羌塘中部^[11]及拉萨地体^[12]等高压-超高压榴辉岩带。近 20 年来,国内外地学界对以榴辉岩为代表的高压-超高压变质岩开展了原岩特征^[9,11-12,21,23,25,29]、俯冲深度^[15-17,30-35]、变质作用^[13,19-20,36]、超高压矿物^[14,18]等方面的广泛研究,并取得重要进展。但由于高压-超高压变质过程的复杂性、多样性,许多重要问题并没有解决,新的问题不断涌现,某些问题变得更加突出和更富挑战性。例如:大洋、大陆岩石圈板块究竟能俯冲到多大深度?大洋、大陆俯冲过程中不同地质环境下的流体行为如何?俯冲过程中的壳-幔相互作用及地球物质再循环过程如何?超高压变质岩的形成与折返机制是什么?

作为示踪物质来源和形成演化过程的一种重要手段,对高压-超高压变质岩进行深入的同位素地球化学研究,有助于探讨榴辉岩研究中所遇到的许多问题。目前,多位学者先后将 O 同位素^[37-39]、Sr-Nd 同位素^[40-42]、He 同位素^[32,35,43-45]等示踪技术引入榴辉岩及其高压-超高压变质作用的研究中。但目前利用其他研究手段得出的认识,与 He 同位素示踪获得的认识,两者在榴辉岩成因及俯冲深度上还存在分歧。

2 He 同位素的示踪作用

He 是稀有气体元素,具有特殊的地球化学性质(如化学不活泼性和强烈的挥发性),而且,He 同位素组成在地壳和地幔物质之间存在较大的分馏,地球不同圈层具有不同的 He 同位素比值,且相差较大。所以,与其他同位素示踪技术相比,He 同位素已成为区分地壳、地幔物质,研究壳-幔相互作用最灵敏的示踪剂^[46]。例如,地幔 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 6~7 Ra^[47],地壳 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.01~0.05 Ra^[48],相差约 1000 倍,因此,只要成岩物质中有少量地幔 He 的加入,就会使成岩物质的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值发生较大

变化。

Zartman^[49] 20 世纪 60 年代初期最早研究了天然气中的稀有气体同位素示踪地壳现代流体的来源及其水-岩相互作用历史,开拓了稀有气体地球化学的研究。20 世纪 70 年代中期以来,稀有气体同位素在示踪研究领域得到了广阔的发展与应用。目前,He 同位素在示踪地壳现代流体^[50]、成矿古流体^[51-56]、陨石源区^[57,58]等方面已得到广泛应用。稀有气体同位素在地质方面的研究及应用进展参见汤华云^[59]、李兆丽^[60]、李晓斌^[61]及马锦龙^[62]等文献。

3 He 同位素在榴辉岩研究中的应用及其存在的问题

榴辉岩相高压-超高压变质岩的 He 同位素研究对于探讨高压-超高压变质过程中的变质岩形成环境、岩石圈板块的俯冲深度、壳-幔相互作用、地球物质再循环过程及高压-超高压变质岩的形成与折返机制等都具有重要意义。由于榴辉岩变质形成过程的复杂性、其在世界各地分布的局限性、榴辉岩中 He 同位素分析方法不够完善等原因,目前榴辉岩中 He 同位素的研究还存在很多问题需要探讨和解决。国外对于榴辉岩的 He 同位素研究,至今未见报道。国内对榴辉岩进行 He 同位素研究,目前只局限在大别地区^[32,35,43-45]。

随着 He 同位素分析技术的快速发展及仪器设备的不断更新,现在国内已拥有一批高精度并运行良好的稀有气体质谱计(如 VG5400),可充分保证 He 同位素测试数据的准确性和可靠性,部分学者利用 He 同位素开展了榴辉岩及其高压-超高压变质作用的研究,但获得的认识与其他研究方法获得的认识存在明显差异:(1)是否属于俯冲成因;(2)俯冲深度。以大别山超高压变质岩为例,该带榴辉岩单矿物的氦同位素分析认为研究区的榴辉岩可能是一种源于亏损型地幔的岩石^[45],而其他研究方法获得的认识则认为该带榴辉岩是大陆地壳俯冲成因^[15-17]。对于榴辉岩的俯冲深度,利用其他研究方法获得的认识存在很大的差异,如徐树桐等^[30]及 Ye 等^[17]认为俯冲可达 80~120 km,部分可达 200 km 或更深;Zhu 等^[33]认为大于 250 km;金振民等^[31]认为在 300 km 以上;Zhou 等^[34]认为只在几十千米的深度。而伍宗华等^[32]通过大别—苏鲁地区不同类型变质岩的 He 同位素研究认为俯冲已达地幔深度,李善芳等^[35]通过榴辉

岩全岩及其单矿物的 He 同位素研究则认为榴辉岩可能是在地壳中形成的,并未曾俯冲至 100 多千米的地幔深度。既然 He 同位素的分析结果是可靠的,为什么 He 同位素获得的认识与其他研究方法获得的认识存在分歧?为什么同样采用 He 同位素获得的认识却截然不同?

笔者认为,造成这些分歧的根本原因在于对 He 同位素在榴辉岩及其相关变质岩形成过程中的地球化学行为还不是很清楚,特别是对 He 同位素能否记录俯冲所达地幔深度的地球化学信息这一重要问题还存在争议。一种观点认为,由于在大洋、大陆板块向下俯冲的过程中,绝大部分流体在绿泥石分解和蛇纹石分解的温压条件下逸散^[6],即榴辉岩原岩中所含的 He 大量丢失,同时也将陆壳、洋壳放射性成因的 He 及放射性元素(U、Th)带到俯冲所达到的地球深部;而且,He 作为自然界中扩散迁移能力最强的元素,在高温条件下很容易与周围环境中的 He 同位素达到平衡^[49](目前研究的所有榴辉岩的形成温度基本都大于 500°C,在这种条件下 He 的扩散迁移能力很强)。因此,如果俯冲到达了地幔深度,在这种高温高压条件下,随着变质过程中榴辉岩原岩所含的 He 基本丢失,同时周围地幔中高浓度 He 的不断加入,结果造成榴辉岩形成环境中的 He 应为洋壳、陆壳 He 与地幔 He 的混合物,榴辉岩及其超高压变质岩中 He 同位素应该会记录下这种混合信息。而另一种观点认为,虽然 He 的扩散迁移能力很强,但由于俯冲陆块和被冲入区的地幔都很“干”,基本没有流体,加之俯冲和折返的速度太快,所以导致表壳原岩在变质时来不及与地幔物质发生充分的同位素交换,可能没有留下地幔物质参与的痕迹。

从形成至今,样品中的 He 除了受当时的成岩环境和成岩物质的影响外,还可能受后生叠加、后期扩散丢失及同位素分馏的影响。因 ^3He 的后生叠加从而导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值升高的后期因素主要包括宇宙射线作用和核反应。榴辉岩大多数形成于地壳深部或地球更深的位置,并未经历过宇宙射线长期、强烈的辐射,所以宇宙成因 ^3He 对其造成的后生叠加影响不大。后期由 K、Li、U、Th 相互联动耦合参与核反应生成的核成因 ^3He 对测试样品的影响,要通过检测榴辉岩中 K、Li、U、Th 的含量来进行评估和排除。因后期地质作用而造成 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值降低的可能因素主要包括以下几个方面:(1) ^3He 的后期扩散

丢失。前人的研究表明,超镁铁质、镁铁质岩石对稀有气体具有很好的保存能力^[64-66],故因 ^3He 的后期扩散丢失造成的影响不大。(2)后期放射性衰变生成的 ^4He ,目前已发现的榴辉岩的成岩年龄早晚不一,但在这个漫长的地质过程中,榴辉岩中或多或少都存在部分放射成因 ^4He 。(3)地壳流体对榴辉岩的淋漓作用,由铀、钍放射性衰变及锂中子反应产生的放射性成因地壳氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 特征比值为 0.01~0.05 Ra^[49],因此榴辉岩如果受到过地壳流体的侵蚀或与地壳流体发生过交代作用,分析所得 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值也需要考虑淋漓作用造成的影响。

4 发展趋势

为进一步查明 He 同位素在榴辉岩相高压-超高压变质过程中的地球化学行为并推动其在高压-超高压变质作用中的应用,笔者认为今后可加强以下几个方面的工作:

(1)开展不同温压条件、不同产出特征榴辉岩及其相关变质岩的 He 同位素研究

由上述分析可知,榴辉岩及相关变质岩的 He 同位素组成与其形成时的深度(深度可用具有不同温压变质条件的样品指示)、大洋/大陆俯冲时携带的放射性成因 He、不同 U、Th 含量岩石的后期后生叠加等因素的影响。通过系统分析测试不同温压条件、不同产出特征(从围岩-接触带-岩石)榴辉岩的 He 同位素组成,查明不同形成条件下榴辉岩及相关变质岩中的 He 同位素地球化学行为。特别对具较高形成温度和压力的样品,重点开展其 He 同位素研究,可有助于回答 He 同位素是否可以记录俯冲所达地幔深度的信息这一重要问题。

(2)开展 He 同位素的寄主矿物学研究

由于高压-超高压变质过程的复杂性、多期性,加之受后期影响的因素比较多,因此用混合全岩样品的 He 分析结果讨论其成因需要慎重。U、Th 为大离子不相容元素,不易进入石榴子石和绿辉石晶格,目前已有学者用石榴子石和绿辉石代替混合全岩测定样品中的 He 同位素组成^[45]。但是所得结果仍然是释 He 全过程的加权平均值,不能很好地反映形成条件下的 He 同位素组成。因此,开展不同期次标志性矿物的 He 同位素研究,以及开展原位 He 同位素的分析是得到最接近形成环境中原始 He 同位素组成首先要解决的问题。

(3)He 同位素研究与流体作用研究相结合

近年来,榴辉岩流体作用研究表明部分榴辉岩含有大量绿辉石脉体、绿辉石含有流体包裹体等富含流体作用的信息。由此看来,在大洋/大陆板块向下俯冲过程中是否有流体的参与,流体作用如何影响 He 同位素的分馏,这是正确解读 He 同位素组成的重要前提。目前已在俯冲大陆壳(大别山、挪威加里东带)和俯冲洋壳(西天山、New Caledonia)的流体作用研究方面取得了大量创新成果^[67]。Gao 等^[68-69]发现蓝片岩向榴辉岩相岩石转变过程中流体作用记录的地质实例,对探讨洋壳俯冲过程中的流体作用具有重要科学意义;以西天山造山带为解剖对象,识别出洋壳俯冲时流体释放的地质记录,初步确认流体在俯冲带深部运输过程中将导致微量元素成分的变化。张泽明等^[70]的研究提出,大陆俯冲带的深部流体是高氧度的富硅酸盐超临界流体,揭示超高压条件下超临界流体-矿物(岩石)相互作用可以导致不活动元素发生迁移。Fu 等^[71]、Xiao 等^[72]等也对变质作用过程中的流体作用开展深入研究。

大陆俯冲成因榴辉岩基本没有经历流体作用,而大洋俯冲成因榴辉岩的原岩在俯冲前处于大洋环境,原岩中必然含有大量的含水矿物,这些矿物中的结构水及俯冲过程中可能携带的部分海水,在俯冲过程中是否形成流体?在地幔深度的高温高压下能否促进 He 同位素的平衡和交换?通过系统研究富含流体包裹体的榴辉岩和不含流体包裹体的榴辉岩的 He 同位素组成,可以明确矿物内的流体包裹体对 He 同位素组成的影响,为进一步探讨高压-超高压变质过程中深部物质与 He 同位素的交换作用及程度提供依据。

参考文献 (References):

- [1] Smith D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics[J]. *Nature*, 1984, 310:641-644.
- [2] Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps; A first record and some consequences [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1984, 86:107-118.
- [3] Xu Zhiqin. Etude tectonique et microtectonique de la chaine paleozoique et triasique des Qinling (China) [D]. Academie de Montpellier University des Sciences et Techniques du Languedoc, PhD thesis, 1987, 96-98.
- [4] Sobolev N V, Shatsky V S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: A new environment for diamond formation[J]. *Nature*, 1990, 343:742-746.
- [5] Ernst W G, Liou J G. Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphics [J]. *Geology (Boulder)*, 1995, 23(4):353-356.
- [6] Tagiri M, Bakirov A, Nakajima T, et al. Mineral parageneses and metamorphic P-T paths of ultrahigh-pressure eclogites from Kyrgyzstan Tien-shan[J]. *The Island Arc*, 1995, 4:280-292.
- [7] Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation[J]. *Int. Geol. Rev.*, 1996, 38:490-596.
- [8] Reinecke T. Prograde high to ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation of oceanic sediments at Lagodi Cignana, Zermatt-Sea zone, western Alps[J]. *Lithos*, 1998, 42:147-189.
- [9] Zhang L, Ellis D J, Jiang W. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part I. Evidence from inclusions of coesite pseudomorphs in garnet and from quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogite [J]. *American Mineralogist*, 2002, 87:853-860.
- [10] Zhang L F, Song S G, Ai Y L, et al. Relict coesite exsolution in omphacite from western Tianshan eclogites, China [J]. *American Mineralogist*, 2005, 89:180-186.
- [11] Li C, Zhai Q G, Dong Y S, et al. Discovery of eclogite and its geological significance in Qiangtang area, central Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(9):1095-1100.
- [12] 杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带[J]. *地质学报*, 2006, 8(12):1787-1792.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Geng Quanru, et al. A possible new HP-UHP (?)metamorphic belt in China: discovery of eclogite in the Lhasa terrane, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80:1787-1792 (in Chinese with English abstract).
- [13] Wang X, Liou J G, Maruyama S. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains, central China: petrogenesis, P-T paths and implications for regional tectonics [J]. *Journal of Geology*, 1992, 100: 231-250.
- [14] Xu S T, Okay A I, Ji S, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implications for tectonic setting [J]. *Science*, 1992, 256:80-83.
- [15] Zhang R Y, Shu J F, Mao H K, et al. Magnetite lamellae in olivine and clinohumite from Dabie UHP ultramafic rocks, central China[J]. *American Mineralogist*, 1999, 84:564-569.
- [16] Yang J, Jahn B M. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China[J]. *J. Metamorphic Geol.*, 2000, 18:167-180.
- [17] Ye Kai, Cong B, Ye D N. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km[J]. *Nature*, 2000, 407:734-736.
- [18] 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型的超高压矿物——柯石英[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 175-179.
Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, et al. Discovery of

- coesite in the north Qaidam early Paleozoic ultrahigh -high pressure (UHP -HP) metamorphic belt, NW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 175-179 (in Chinese with English abstract).
- [19] 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及地质意义[J]. *科学通报*, 1996, 41(14):1485-1488.
Liu Liang, Che Zicheng, Luo Jinhai, et al. Identification of the eclogite at the west part of Altyn Tagh Mountains and its geological implications[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1996, 41(14): 1485-1488(in Chinese).
- [20] 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据[J]. *科学通报*, 2002, 47(3):231-234.
Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. Evidence for UHP metamorphism of eclogite from the Altun Mountains [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2002, 47(3):231-234(in Chinese).
- [21] 胡能高, 赵东林, 徐柏青, 等. 北秦岭含柯石英榴辉岩的发现及其意义[J]. *科学通报*, 1994, 39(21):2013.
Hu Nengao, Zhao Donglin, Xu Baiqing, et al. Discovery of coesite-bearing eclogite in North Qinling and its significance [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1994, 39(21):2013(in Chinese).
- [22] 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 秦岭发现金刚石:横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及中生代和中生代两期深俯冲作用的识别[J]. *地质学报*, 2002, 76(4):484-495.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Pei Xianzhi, et al. Discovery of Diamond in North Qinling: Evidence for a giant UHPM belt across central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze Plates [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76 (4):484-495 (in Chinese with English abstract).
- [23] 高俊. 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义 [J]. *科学通报*, 1997, 42(7):737-740.
Gao Jun. Discovery of eclogites from southwestern Tianshan and its tectonic implications [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1997, 42(7): 737-740(in Chinese).
- [24] 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J]. *地质学报*, 1978, 54(1):287-295.
Xiao Xuchang, Chen Guomin, Zhu Zhizhi. The tectonic significance of ancient ophiolite of Qilian Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1978, 54 (1): 287-295 (in Chinese with English abstract).
- [25] 吴汉泉, 冯益民, 霍有光. 北祁连山中段甘肃南奥陶系变质硬柱石蓝闪片岩的发现及其意义[J]. *地质评论*, 1990, 36 (3):277-280.
Wu Hanquan, Feng Yimin, Huo Youguang. The discovery of Ordovician lawsonite-glaucophane schist in the middle section of the northern Qilian mountains, and its significance [J]. *Geological Review*, 1990, 36 (3):277-280(in Chinese with English abstract).
- [26] 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义 [J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 558-564.
Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, et al. $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ geochronology of high-pressure/low-temperature blueschist and eclogite in the North Altyn Tagh and their tectonic implications[J]. *Geology in China*, 2007, 34(4):558-564(in Chinese with English abstract).
- [27] 梅华林, 于海峰, 李铨, 等. 甘肃北山地区首次发现榴辉岩和古元古花岗岩质岩石[J]. *科学通报*, 1998, 43(19):2105-2111.
Men Hualin, Yu Haifeng, Li Quan, et al. The first discovery of eclogite and Palaeoproterozoic granitoids in the Beishan area, northwestern Gansu Province, China[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1998, 43(19): 2105-2111(in Chinese).
- [28] 杨经绥, 吴才来, 陈松永, 等. 甘肃北山地区榴辉岩的变质年龄:来自锆石的 U-Pb 同位素定年证据 [J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 317-325.
Yang Jingsui, Wu Cailai, Chen Songyong, et al. Neoproterozoic eclogite metamorphic age of the Beishan eclogite of Gansu, China: Evidence from SHRIMP U-Pb isotope dating [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2):317-325(in Chinese with English abstract).
- [29] 倪志耀, 翟明国, 王仁民, 等. 华北古陆块北缘中段发现晚古生代退变榴辉岩[J]. *科学通报*, 2004, 49(6):585-591.
Ni Zhiyao, Zhai Mingguo, Wang Renmin, et al. Discovery of Neopaleozoic degreasing eclogite in north of Huabei block [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2004, 49(6):585-591(in Chinese).
- [30] 徐树桐, 苏文, 刘贻灿, 等. 大别山东段高压变质岩中的金刚石[J]. *科学通报*, 1991, 36(17):1318-1321.
Xu Shutong, Su Wen, Liu Yican, et al. Diamond in high pressure metamorphic Rocks in the east section of the Dabie mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36 (17):1318-1321 (in Chinese with English abstract).
- [31] 金振民, 金淑燕, 高山, 等. 大别山超高压岩石形成深度局限于 100-150km 吗? ——针状钛铬磁铁矿的发现及动力学意义的思考[J]. *科学通报*, 1998, 43(7):767-771.
Jin Zhenmin, Jin Shuyan, Gao Shan, et al. Is the depth of formation of ultrahigh-p rock from the Dabie Mountains limited to 100-150 km? —Discovery of Ti-Cr magnetite needle and its significance for dynamics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(7): 767-771(in Chinese).
- [32] 伍宗华, 古平等, 刘华忠. 大别山超高压变质岩带氦同位素组成和某些微量元素分布[J]. *物探与化探*, 2001, 25(4):259-265.
Wu Zonghua, Gu Pingdeng, Liu Huazhong. Helium isotopic composition and trace elements distribution in Dabie Mountain Ultrahigh pressure metamorphic complex belt [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2001, 25 (4):259-265 (in Chinese with English abstract).
- [33] Zhu Y F, Ogasawara Y. Carbon recycled into deep Earth:evidence from dolomite dissociation in subduction-zone rocks [J]. *Geology*, 2002, 30:947-950.
- [34] Zhou Y S, Zhong D L, He C R. Upper limit for rheological strength of crust in continental subduction zone: Constraints imposed by laboratory experiments [J]. *Journal of China University*

- of Geosciences, 2004, 15(2):167-174.
- [35] 李善芳, 李延河, 丁梯平, 等. 大别山超高压变质榴辉岩的氦同位素组成及其形成环境的制约 [J]. 地质论评, 2005, 51(3): 243-249.
- Li Shanfang, Li Yanhe, Ding Tiping, et al. Helium isotope compositions and forming conditions of UHP metamorphic eclogites from the Dabie mountains terrane in east China [J]. Geological Review, 2005, 51(3): 243-249(in Chinese with English abstract).
- [36] 杨建军. 中国东部山东和江苏北部的榴辉岩、辉石岩和有关的超基性岩[M]. 北京:地质出版社, 1991:26-52.
- Yang Jianjun. Eclogites, garnet, pyroxenites and related ultrabasics in Shandong and north Jiangsu of east China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 26-52 (in Chinese with English abstract).
- [37] Yui T F, Rumble III D, Lo C H. Unusually low $\delta^{18}\text{O}$ ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Sulu Terrain, eastern China [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, 59:2859-2864.
- [38] Zheng Y F, Wang Z R, Li S G, et al. Oxygen isotope equilibrium between eclogite minerals and its constraints on mineral Sm-Nd chronometer[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2002, 66:625-634.
- [39] Zheng Y F, Zhao Z F, Li S G., et al. Oxygen isotope equilibrium ultrahigh-pressure metamorphic minerals and its constraints on Sm-Nd and Rb-Sr chronometers [C]//Vance D, Muller W, Villa I (eds). Geochronology: Linking the Isotope Record with Petrology and Textures. Special Publication-Geological Society, 2003, 220:93-117.
- [40] Li S G., Jagoutz E, Chen Y Z, et al. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(6): 1077-1093.
- [41] Xie Z, Zheng Y F, Jahn B, et al. Sm-Nd and Rb-Sr dating of pyroxene-garnetite from North Dabie in east-central China: problem of isotope disequilibrium due to retrograde metamorphism [J]. Chemical Geology, 2004, 206:137-158.
- [42] 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
- [43] 李延河, 刘晓春, 宋鹤彬, 等. 大别苏鲁地区榴辉岩的 He 同位素特征及地质意义[J]. 地球科学, 1997, 18(增刊):77-79.
- Li Yanhe, Liu Xiaochun, Song Hebin, et al. Helium isotope of eclogites from the the Dabie and Su-Lu region and its implication [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(Sup.):77-79(in Chinese with English abstract).
- [44] 孙明良, 叶先仁, 杜建国. 大别山榴辉岩的单矿物中 He、Ar 同位素特征[J]. 地球科学, 1997, 18(增刊):80-82.
- Sun Mingliang, Ye Xianren, Du Jianguo, et al. He and Ar isotopic compositions in the minerals separated from Dabie eclogites[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(Sup.):80-82.
- [45] 杜建国, 张建珍, 孙明良, 等. 大别山榴辉岩氦同位素组成及其地质意义[J]. 科学通报, 1998, 43(4):431-434.
- Du Jianguo, Zhang Jianzhen, Sun Mingliang, et al. Isotopic composition of helium in eclogite from the Dabie Mountains, central China and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(4):431-434(in Chinese).
- [46] Stuart F M, Turner G, Duckworth R C, et al. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean floor sulfides [J]. Geology, 1994, 22:823-826.
- [47] Dunai T, Touret J L R. Helium, neon and argon isotope systematics of European lithospheric mantle xenoliths: implications for its geochemical evolution [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 2767-2783.
- [48] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids; He-Ar isotopes in fluid inclusions from DaeHwa W-Mo mineralisation, South Korea [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59:4663-4673.
- [49] Zartman R E. Wasserburg G J, Reynolds J H. Helium, argon and carbon in some natural gases [J]. J. Geophys., Res., 1961, 66:277-306.
- [50] 徐永昌. 天然气中氦同位素分布及构造环境[J]. 地学前缘, 1997, 4(3/4):185-190.
- Xu Yongchang. Helium isotope distribution of natural gasses and its structural setting[J]. Earth Sci. Frontiers, 1997, 4(3/4), 185-190 (in Chinese with English abstract).
- [51] Turner G, Stuart F. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulfides from the ocean floor[J]. Nature, 1992, 375: 581-583.
- [52] Baptiste P J, Fouquet Y. Abundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at 13°N [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60:87-93.
- [53] Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, et al. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China[J]. Chemical Geology, 2004, 203: 305-317.
- [54] 毛景文, 魏家秀. 大水沟碲矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及其示踪成矿流体的来源[J]. 地球学报, 2000, 21(1):58-61.
- Mao Jingwen, Wei Jiaxiu. Helium and Argon isotopic components of fluid inclusions and tracing to the source of metallogenic fluids in the Dashuigou tellurium deposit of Sichuan Province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 21(1):58-61 (in Chinese with English abstract).
- [55] Xue C J, Chen Y C, Wang D, et al. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, northwest Yunnan, China[J]. Science in China (Series D), 2003, 46:789-800.
- [56] Li Z L, Hu R Z, Peng J T, et al. Helium isotopic geochemistry of ore-forming fluids of Furong tin deposit in Hunan Province, China[J]. Resource Geology, 2006, 56(1):9-16.

- [57] 王道德. 我国某些球粒陨石及中铁陨石稀有气体的同位素丰度[J]. 空间科学学报, 1998, 18(4):336-341.
Wang Daode. Noble gas isotopic abundance in some chondrites and middle-ferrous aerolites in China [J]. Chinese Jour. Space Sci., 1998, 18, 336-341(in Chinese with English abstract).
- [58] Park J, Kazaki R, Nagao K. Noble gas studies of Martian Meteorites; Dar Al Gani 476/489, Sayh Al Uhaymir 005/060, Dhofar 019, Los Angeles 001 and Zagami[C]. Proceeding of Lunar and Planetary Science Conference 34th, 2003, 1213.
- [59] 汤华云, 郑建平. 稀有气体在深部地质研究中的意义[J]. 世界地质, 2004, 23(1):20-27.
Tang Huayun, Zheng Jianping. Significance of noble gas study in deep process research [J]. Global Geology, 2004, 23 (1):20-27(in Chinese with English abstract)
- [60] 李兆丽, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 稀有气体同位素示踪成矿古流体研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1):57-63.
Li Zhaoli, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, et al. Advances in tracing the ore-forming fluids using rare gas isotopes[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1):57-63(in Chinese with English abstract).
- [61] 李晓斌, 陶明信. 地幔柱稀有气体同位素示踪研究的进展及其意义[J]. 地质通报, 2007, 26(12):1605-1610.
Li Xiaobin, Tao Mingxin. Progress in the research on noble gas isotope tracing of the mantle plume and its significance [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26 (12):1605-1610 (in Chinese).
- [62] 马锦龙, 刘春艳, 杨晓军. 稀有气体同位素地球化学研究的新领域、新动向[J]. 地质论评, 2009, 55(2):260-268.
Ma Jinlong, Liu Chunyan, Yang Xiaojun. New research fields and new development tendency on noble gas isotopic geochemistry[J]. Geological Review, 2009, 55(2):260-268 (in Chinese with English abstract).
- [63] Selverstone J, Franz G, Thomas S, et al. Fluid variability in 2 GPa eclogites as an indicator of fluid behavior during subduction [J]. Contrib. Mineral Petro., 1992, 112:341-357.
- [64] Basu A R, Poreda R J, Renne P R, et al. High-³He plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts [J]. Science, 1995, 269:822-825.
- [65] Matsumoto T, Seta A, Matsuda J, et al. Helium in the Archean komatiites revisited: significantly high ³He/⁴He ratios revealed by fractional crushing gas extraction [J]. Earth Planet Sci. Lett., 2002, 196: 213-225.
- [66] 叶先仁, 陶明信, 余传鳌, 等. 用分段加热法测定的雅鲁藏布江蛇绿岩的 He 和 Ne 同位素组成: 来自深部地幔的信息[J]. 中国科学(D), 2007, 37 (5):573-583.
Ye Xianren, Tao Mingxin, Yu Chuanao, et al. Helium and neon isotopic composition in the ophiolites from the Yarlung Zangbo river, southwestern China: the information from deep mantle. Science in China(Series D), 2007, 37 (5):573-583(in Chinese).
- [67] Hermann J, Spandler C, Hack A, et al. Aqueous fluids and hydrous melts in high-pressure and ultra-high pressure rocks: Implications for element transfer in subduction zones[J]. Lithos, 2006, 92:399-417.
- [68] Gao J, Klemd R. Eclogitization of blueschists by aqueous fluid infiltration[J]. Science in China (D), 2000, 43(supp.), 144-155.
- [69] Gao J, Klemd R. Primary fluids entrapped at blueschist to eclogite transition: evidence from the Tianshan meta-subduction complexes in northwestern China [J]. Contrib. Mineral. Petro., 2001, 142:1-14.
- [70] 张泽明, 沈昆, 赵旭东, 等. 超高压变质作用过程中的流体——来自苏鲁超高压变质岩岩石学氧同位素和流体包裹体研究的限定[J]. 岩石学报, 2006, 22(7):1989-1998.
Zhang Zemin, Shen Kun, Zhao Xudong, et al. Fluid during the UHP metamorphism: constraints from the petrology, oxygen isotope and fluid inclusion studies of the Sulu UHP metamorphic rocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (7): 1989-1998 (in Chinese with English abstract).
- [71] Fu B, Zheng Y F, Wang Z R, et al. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of gneisses associated with ultrahigh pressure eclogites at Shuanghe in the Dabie Mountains [J]. Contrib. Mineral. Petro., 1999, 134:52-66.
- [72] Xiao Y L, Zhang Z M, Hoefs J, et al. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project - II . Oxygen isotope and fluid inclusion distributions through vertical sections [J]. Contrib. Mineral. Petro., 2006, 152:443-458.

Helium isotopic geochemistry of HP–UHP eclogite facies metamorphic rocks: a review

LI Zhao-li, LI Tian-fu

*(State Key Laboratory for Tectonic and Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences,
Beijing 100037, China)*

Abstract: The helium isotopic composition of each sphere of the Earth has its characteristic isotopic ratios. These ratios show significant differences. Therefore, helium isotopes, as a tracer, are more sensitive than other isotopes to distinguishing crust from mantle materials. Up till now, geochemical behaviors of helium isotopes during the HP–UHP metamorphism have not been well studied, it led to the limited application of helium isotope in eclogites. Many HP–UHP eclogite belts have been discovered in China. These eclogites can be genetically classified into two types: one is associated with subduction of the continental slab, and the other is formed by the subduction of the oceanic slab. This paper reviewed the progresses therefore of HP–UHP eclogite facies metamorphic rocks well studied and some problems and future work of the application of helium isotope in eclogites are also discussed.

Key words: helium; isotope geochemistry; eclogite; HP–UHP metamorphism

About the first author: LI Zhao-li, female, born in 1976, associate researcher, mainly engages in the study of petrology and geochemistry; E-mail: lizhaoli@ccsd.cn.