

CCSD HP-UHP 变质岩中石英脉和东海水晶流体包裹体惰性气体同位素组成及其成因指示意义*

孙晓明^{1,2} 徐莉¹ 翟伟¹ 汤倩¹ 梁业恒¹ 梁金龙¹ 张泽明³ 沈昆⁴

SHUI XiaoMing^{1,2}, XU Li¹, ZHAI Wei¹, TANG Qie¹, LIANG YeHeng¹, LIANG JinLong¹, ZHANG ZeMing³ and SHEN Kun⁴

1. 中山大学地球科学系, 广州 510275

2. 中国科学院同位素年代学和地球化学实验室, 广州 510640

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

4. 山东省地质科学研究院, 济南 250013

1. *Earth Sciences Department of Sun Yatsen University, Guangzhou 510275, China*

2. *Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*

3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

4. *Geological Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China*

2006-04-10 收稿, 2006-06-12 改回.

Sun XM, Xu L, Zhai W, Tang Q, Liang YH, Liang JL, Zhang ZM and Shen K. 2006. Noble gases isotopic compositions of fluid inclusions in quartz veins and crystals collected from CCSD and Donghai HP-UHP metamorphic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7):1999-2008

Abstract A lot of quartz or microcline quartz veins are found in the CCSD HP-UHP rocks, and different genetic models of the veins have been proposed, among which the two most representative ones are plate exhumation and fluid releasing model and late stage fluid penetration model. In this study, noble gas isotopic compositions of fluid inclusions in the CCSD quartz veins and quartz crystals in the Donghai area were analysed by using a high vacuum gas mass spectrum, and their He-Ar, Xe and Ne isotopic compositions clearly show that the fluid inclusions are composed mainly of crustal metamorphic fluid and air-saturated water, and the mantle-derived fluid is nearly negligible. At depth of 900 ~ 1500m in the CCSD, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ of the quartz veins declined in step with $\delta^{18}\text{O}$, and where marked decline of $\delta^{18}\text{O}$ in minerals of HP-UHP rocks were recognized by in-situ $\delta^{18}\text{O}$ analyses, suggesting that the protoliths of the HP-UHP at this depth might have been reacted with air-saturated water before being subducted, and the quartz veins inherit their host rocks's isotopic features. Similar noble isotopic compositions of fluid inclusions imply that the CCSD quartz veins and the Donghai quartz crystals were formed in similar geological environment, and both of them were formed during fluid releasing and pressure decline of the exhumating plate. The negligible content of mantle-derived fluids in the CCSD quartz veins and Donghai quartz crystals show that the Indosinian subduction and exhumation of the HP-UHP rocks in this area may be quite quick, so that the mantle-crust interaction and isotopic exchange might be very limited. Besides, the late stage retrograde metamorphism tends to weaken mantle-derived information of the CCSD HP-UHP rocks.

Key words Fluid inclusions, Noble gas isotopic composition, Quartz veins, Quartz crystals in Donghai area, Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project

摘要 中国大陆科学钻探(CCSD)岩心中存在大量石英脉和长英质脉体,关于其成因目前存在板块折返过程中的减压和流体释放以及后期流体穿插等不同成因观点。本文利用高真空质谱系统分析了CCSD石英脉和东海水晶流体包裹体中惰性气体同位素组成,其He-Ar、Xe和Ne同位素体系均清楚显示它们主要由地壳变质流体和大气饱和水组成,而基本不含深

* 国家自然科学基金(编号:40399142)、中国科学院同位素年代学和地球化学实验室合作基金(GIGIso-0504)、国家重点基础研究发展规划项目(973项目)(编号:2003CB716501)和中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(编号:2003015)联合资助。

第一作者简介:孙晓明,男,1963年生,教授、博士生导师,主要从事矿床地球化学研究, E-mail: eessxm@mail.sysu.edu.cn

源地幔流体。在 CCSD 900 ~ 1500m 深度的石英脉流体包裹体出现 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同步下降,且与前人对 CCSD 中 HP-UHP 岩石的矿物原位 $\delta^{18}\text{O}$ 测定结果变化趋势相似,说明该段原岩在板块俯冲前曾与大气降水发生较为充分的水/岩反应,石英脉继承了围岩的同位素组成特征。流体包裹体惰性气体同位素组成显示 CCSD 中石英脉和东海水晶可能具有相似的成因,它们均主要形成于 HP-UHP 岩石在板块折返到地壳中的压力降低和流体释放过程。CCSD HP-UHP 岩石及其石英脉中基本不含地幔流体的原因在于本区印支期快速的俯冲和折返过程,被俯冲地壳物质无法与地幔进行充分的同位素交换。此外,退变质作用及其伴生的地壳流体也进一步减弱了 HP-UHP 岩石中的地幔流体信息。

关键词 关键词: 流体包裹体; 惰性气体同位素组成; 石英脉; 东海水晶; 中国大陆科学钻探 (CCSD)

中图分类号 P597.2; P578.494

1 引言

5158m 的中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔中及其周围主要由各类榴辉岩、斜长角闪岩、副片麻岩、正片麻岩以及少量的超基性岩、片岩和石英岩等组成,同时,在 HP-UHP 岩石中还普遍出现呈透镜状、团块状、囊状和条带状产出的石英脉或长英脉。此外,东海境内还可见大量出露地表的石英脉或水晶巨晶矿床。前人对 CCSD 中 HP-UHP 岩石的地质地球化学和流体地球化学进行了较为系统的研究 (沈昆等 2005; Zhang *et al.* 2005), 但对其中石英脉等脉体的研究还罕见。徐莉等 (2005) 对 CCSD 石英脉中的流体包裹体进行了初步研究,在其中发现了 3 类流体包裹体,并对其氢氧同位素组成进行了初步研究,发现在 CCSD 剖面上石英脉的 $\delta^{18}\text{O}$ 出现有规律的变化,局部出现 $\delta^{18}\text{O}$ 明显下降现象 (徐莉等, 2006), 类似于张泽明等 (2004b) 对 CCSD 中 HP-UHP 岩石氧同位素组成的原位测定结果。CCSD 中石英脉或长英脉的成因到底如何? 它们与东海地区广泛出露的石英脉和水晶巨晶间有何成因上的联系? 其中是否保留了板块俯冲和折返的有关信息? 尚有待进一步的研究。

上世纪八十年代以来,惰性气体同位素体系被广泛应用于成矿物质和成矿过程的地球化学示踪研究,取得了许多重要的成岩成矿信息 (Simmons *et al.*, 1987; Stuart *et al.*, 1995; Baptiste *et al.*, 1996; 胡瑞忠等, 1997, 1998; 李延河等, 1999; 孙晓明等, 1999, 2003, 2006; Burnard *et al.*, 1999; 侯增谦等, 1999; 曾志刚等, 2000; Winckler *et al.*, 2001; 赵葵东等, 2002; 曹志敏等, 2002; Ballentine *et al.*, 2002; Graham, 2002; 薛春纪等, 2003; Mao *et al.*, 2002, 2003; Moreir *et al.*, 2003), 其主要原因在于惰性气体同位素组成在水/岩反应等地质过程中变化不大,且不同来源的地质流体的惰性同位素组成差异甚大,因此其组成可以反映成矿流体来源和演化过程的原始信息。作者等利用高真空气体同位素质谱仪对 CCSD 0 ~ 2000m 中石英脉和东海地区地表出露的石英脉及水晶矿等进行了惰性气体同位素组成测定,在此基础上对上述问题进行了初步的探讨。

2 样品和分析方法

本次研究所用样品主要采自 CCSD 2000m 以上的各类榴

辉岩、角闪岩和片麻岩中的石英脉和长英脉、东海地区地表出露和浅埋的石英脉或水晶矿等共 19 件,其各自采样位置和围岩类型见表 1。CCSD 中石英脉和长英脉大小不等,形态各异,但一般宽为数 cm。其组成矿物为透明到乳白色石英、微斜长石和白云母等,局部含磷灰石团块 (汤倩等, 2006)。总体来说,榴辉岩中的石英脉多呈无色透明,而片麻岩中者含较多的肉红色微斜长石。冷热台和激光拉曼光谱测定显示 CCSD 石英脉中存在 3 种流体包裹体: 盐水溶液 (NaCl-H₂O) 包裹体 (I 类)、NaCl-CaCl₂-H₂O (II 类) 和 N₂-CH₄ 纯气相 (III 类) 包裹体,其中 I 类可进一步分为高盐度 (Ia)、中等盐度 (Ib) 和低盐度者 (Ic) 三个亚类,详情参见徐莉等 (2005)。

将有关样品破碎至 0.2 ~ 0.5mm 粒级,双目镜下手工挑选纯度高于 99% 的单矿物 1g 左右备用。惰性气体同位素分析在中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室完成,测试仪器为英国 Micromass 公司生产的 MM5400 型气体质谱仪,实验条件为: 发射电流 $I_{t_4} = 800\text{Ma}$, $I_{t_{40}} = 200\mu\text{A}$, 高压为 9.000kV。实验流程: 将洗净并烘干的样品称重后用铝箔包好置于样品台中,随后密封抽真空,当压力达 $1 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 时,加热样品到 130℃ 并烘烤 10h 以上,以除去样品表面吸附和次生包裹体中的气体,后用电阻炉加热熔样坩锅中样品至 1000℃,释放出的气体被吸入超真空气体净化系统,在液氮温度下用活性炭阱将惰性气体分离为 He + Ne 和 Ar + Kr + Xe 两部分,然后分别送进气体质谱仪测定其同位素组成。此次分析中 MM5400 型气体质谱仪的最低热本底值 (mol) 为: $^4\text{He} = 1.1 \times 10^{-14}$; $^{20}\text{Ne} = 1.82 \times 10^{-14}$; $^{40}\text{Ar} = 6.21 \times 10^{-13}$; $^{84}\text{Kr} = 1.37 \times 10^{-16}$; $^{132}\text{Xe} = 5.65 \times 10^{-18}$ 。使用的标样为兰州市皋兰山顶空气 (AIRLZ2003), 各惰性气体同位素组成测定误差小于 10%。具体测定过程参见叶先仁等 (2001)。

3 分析结果和讨论

CCSD 中石英脉和东海水晶等样品的流体包裹体惰性气体同位素组成测定结果见表 1,从中可见: (1) CCSD 中各类榴辉岩中和各类角闪岩及片麻岩中石英脉或长英脉石英和微斜长石的流体包裹体惰性气体同位素组成并无明显的区别,总体表现为 $^3\text{He}/^4\text{He}(\text{R})$ 较低, R/Ra (Ra 为大气

表 1 CCSD HP-UHP 变质岩中石英脉和东海水晶流体包裹体惰性气体同位素组成*

样号	2003558	2003573	2003586	2003564	B247R210P2U	2003589	2003588	2003571
采样位置	CCSD 370. 14m	CCSD965. 50m	CCSD1647. 05m	CCSD521. 90m	CCSD 507. 15m	CCSD1842. 40m	CCSD1783. 35m	CCSD937. 10m
样品描述**	Py + Ru + Q 榴辉岩石英脉	Ru 榴辉岩中 不规则石英脉	榴辉岩中 小石英脉	Py + Ru 榴辉岩中 团块状石英脉	退变质石英 榴辉岩	Ep + Bi 角闪片岩 中石英脉	角闪岩中 石英脉	角闪岩中 石英脉
测定矿物	石英	石英	石英	石英	石英	石英	石英	石英
$^4\text{He}(10^{-8}\text{cm}^{-3}\text{STP/g})$	0. 8512(38)	20. 877(64)	11. 178(36)	5. 174(18)	20. 115(62)	13. 059(41)	9. 811(31)	1. 767(64)
$^{20}\text{Ne}(10^{-8}\text{cm}^{-3}\text{STP/g})$	0. 2128(29)	0. 101(17)	0. 025(54)	0. 087(15)	0. 161(27)	0. 898(72)	0. 094(41)	0. 041
$^{40}\text{Ar}(10^{-6}\text{cm}^{-3}\text{STP/g})$	20. 4512(61)	5. 578(17)	0. 992(30)	3. 718(11)	1. 772(53)	81. 088(24)	11. 894(36)	1. 517(45)
$^{84}\text{Kr}(10^{-10}\text{cm}^{-3}\text{STP/g})$	0. 329(18)	0. 214(96)	0. 097(58)	0. 091(54)	0. 080(46)	4. 368(17)	0. 341(18)	0. 069(28)
$^{132}\text{Xe}(10^{-10}\text{cm}^{-3}\text{STP/g})$	0. 0296(11)	0. 017(70)	0. 019(74)	0. 028(11)	0. 030(10)	0. 029(12)	0. 025(97)	0. 007(34)
$^3\text{He}/^4\text{He}(10^{-6})(\text{R})$	0. 2072(17)	0. 365(10)	0. 070(37)	0. 027(21)	0. 007(8)	0. 348(15)	0. 444(98)	0. 199(10)
R/Ra	0. 148	0. 261	0. 050	0. 019	0. 005	0. 2488	0. 317	0. 142
$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	9. 68(25)	9. 59(23)	9. 41(19)	8. 87(24)	10. 45(24)	9. 451(74)	9. 47(16)	9. 28(43)
$^{22}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	0. 0296(44)	0. 032(76)	0. 031(77)	0. 028(12)	0. 032(90)	0. 028(16)	0. 027(61)	0. 031(12)
$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	0. 1952(20)	0. 187(17)	0. 184(35)	0. 195(22)	0. 191(25)	0. 202((18))	0. 215(20)	0. 192(36)
$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	12274. 7(1301)	4211. 2(396)	1467. 5(179)	5904. 5(871)	3134. 4(332)	25844. 4(2559)	6549. 8(2967)	2055. 5(234)
$^{82}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0. 189(25)	0. 274(12)	0. 240(17)	0. 197(17)	0. 192(27)	0. 201(82)	0. 227(76)	0. 194(10)
$^{83}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0. 218(15)	0. 241(12)	0. 240(14)	0. 225(15)	0. 242(31)	0. 203(62)	0. 212(92)	0. 205(13)
$^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0. 367(22)	0. 288(15)	0. 407(18)	0. 386(19)	0. 342(21)	0. 31/8(44)	0. 274(57)	0. 306(27)
$^{128}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	7. 26(26)	8. 1(84)	9. 7(14)	8. 0(87)	7. 5(57)	7. 0(84)	7. 5(39)	7. 7(19)
$^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0. 961(14)	0. 972(35)	1. 139(50)	1. 029(25)	0. 959(17)	0. 943(35)	0. 975(14)	1. 025(55)
$^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0. 1476(43)	0. 154(13)	0. 186(13)	0. 142(54)	0. 153(45)	0. 144(10)	0. 155(32)	0. 162(14)
$^{131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0. 7743(89)	0. 768(44)	0. 896(28)	0. 759(31)	0. 767(14)	0. 767(28)	0. 757(19)	0. 818(31)
$^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0. 414(15)	0. 392(12)	0. 443(71)	0. 415(82)	0. 383(16)	0. 442(48)	0. 402(76)	0. 476(11)
$^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0. 423(25)	0. 357(11)	0. 408(12)	0. 399(98)	0. 324(11)	0. 392(29)	0. 384(74)	0. 409(24)

* 数据后括号中数值为最后位数字的 1σ 偏差; ** 矿物代号: Py-黄铁矿; Ru-金红石; Q-石英; Mt-磁铁矿; Ep-绿帘石; Bi-黑云母。

续表 1

Continued Table 1

样号	2003587	2003537	2004357	2005033	2005002	2005024-I	2005027	2003569	2003575	2003585	大气
采样位置	CCSD 1775.01m	青龙山	毛北村	虎山	钻井正东 1Km	玉龙山泉	N34°29, 803' E118°45, 265'	CCSD 885.20m	CCSD 998.00m	CCSD 1556.05m	
样品描述	角闪岩中 白色石英脉	Ep 榴辉岩	榴辉岩中 石英脉	片麻岩中水晶	Bi 斜长片 麻岩水晶矿	角闪岩中 水晶矿	Bi 片麻岩夹角 闪岩水晶	Ep 角闪片 麻岩长英脉	角闪榴辉岩 长英脉	石榴长英片麻 岩长英脉	
测定矿物	石英	石英	石英	水晶	水晶	水晶	水晶	微斜长石	微斜长石	微斜长石	
^4He ($10^{-8}\text{ cm}^{-3}\text{ STP/g}$)	55.328(17)	40.096(12)	0.033(60)	0.1635(17)	0.117(15)	0.184(18)	0.121(14)	31.136(94)	2.688(11)	0.768(37)	
^{20}Ne ($10^{-8}\text{ cm}^{-3}\text{ STP/g}$)	0.558(44)	0.058(15)	0.099(19)	0.202(21)	0.103(16)	0.101(16)	0.173(20)	1.064(66)	0.453(46)	1.315(77)	
^{40}Ar ($10^{-6}\text{ cm}^{-3}\text{ STP/g}$)	34.496(10)	0.809(24)	5.309(16)	10.259(31)	3.875(12)	4.368(13)	13.350(40)	64.512(19)	12.275(37)	71.232(21)	
^{84}Kr ($10^{-10}\text{ cm}^{-3}\text{ STP/g}$)	0.533(32)	0.098(45)	0.164(71)	0.455(22)	0.134(67)	0.231(14)	0.354(20)	0.479(33)	1.978(90)	1.062(47)	
^{132}Xe ($10^{-10}\text{ cm}^{-3}\text{ STP/g}$)	0.036(14)	0.010(55)	0.015(55)	0.044(14)	0.018(78)	0.017(71)	0.031(13)	0.018(91)	0.102(38)	0.060(22)	
$^3\text{He}/^4\text{He}$ (10^{-6}) (R)	0.442(81)	0.192(26)	2.688(92)	10.36(19)	170.8(36)	1.176(29)	1.19(37)	0.004(26)	0.186(11)	0.790(46)	1.399
R/Ra	0.315	0.135	1.92	7.4	122	0.84	0.85	0.003	0.133	0.564	1
$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	9.473(40)	9.93(53)	8.96(36)	8.34(24)	8.07(44)	8.54(21)	9.11(32)	8.986(43)	9.75(13)	9.246(26)	9.8
$^{22}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	0.029(23)	0.035(18)	0.0312(15)	0.028(77)	0.037(22)	0.032(12)	0.032(92)	0.031(29)	0.028(31)	0.029(15)	0.029
$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	0.194(23)	0.197(66)	/	0.246(45)	0.199(62)	0.190(55)	0.195(44)	0.198(24)	0.207(93)	0.198(35)	0.188
$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	12862.7 (978)	2211.5 (679)	5731.6 (14461)	7352.4 (3941)	7001.0 (2051)	4859.3 (1555)	8952.4 (226.5)	22479.8 (2922)	1613.4 (158)	14779.1 (1374)	295.5
$^{82}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0.221(29)	0.203(21)	0.208(72)	0.199(65)	0.183(47)	0.209(19)	0.163(77)	0.287(19)	0.187(62)	0.195(47)	0.2022
$^{83}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0.203(13)	0.215(27)	0.204(95)	0.194(43)	0.164(35)	0.218(25)	0.200(14)	0.219(14)	0.206(33)	0.206(99)	0.2014
$^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0.323(27)	0.342(24)	0.325(31)	0.315(67)	0.391(23)	0.330(17)	0.311(19)	0.314(17)	0.319(77)	0.289(18)	0.3052
$^{128}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	7.3(33)	9.2(97)	7.5(50)	7.7(35)	8.3(85)	8.2(93)	7.6(51)	6.9(22)	7.2(28)	7.5(17)	7.14
$^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.959(13)	0.984(40)	0.986(27)	0.957(19)	0.994(21)	0.986(20)	0.947(27)	0.934(13)	0.961(12)	0.975(12)	0.9832
$^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.152(23)	0.151(13)	0.152(84)	0.154(57)	0.155(99)	0.156(74)	0.151(42)	0.152(45)	0.151(20)	0.146(14)	0.1514
$^{131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.786(11)	0.821(22)	0.747(28)	0.764(11)	0.798(21)	0.771(99)	0.797(84)	0.788(15)	0.765(54)	0.802(66)	0.789
$^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.412(49)	0.425(28)	0.403(12)	0.401(74)	0.425(28)	0.391(11)	0.427(13)	0.418(56)	0.387(12)	0.409(93)	0.3879
$^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.390(46)	0.393(16)	0.359(12)	0.357(74)	0.368(20)	0.383(12)	0.443(58)	0.429(56)	0.336(90)	0.378(60)	0.3294

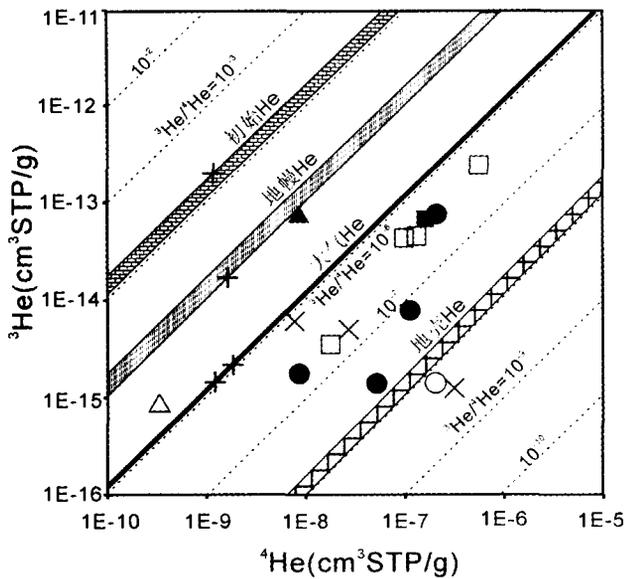


图1 CCSD 石英脉和东海水晶及相关样品的⁴He-³He 图
图中●示 CCSD 榴辉岩中石英脉;○示 CCSD 退变质石英榴辉岩中石英颗粒;■示 CCSD 片麻岩中石英脉;□示 CCSD 角闪岩或角闪片岩中石英脉;▲示东海地表榴辉岩中石英颗粒;△示东海地表榴辉岩中石英脉;+示东海地区水晶矿;×示 CCSD 中长英脉中的微斜长石。图中各种来源 He 的范围据 Mamyryn, 1984 改编。

Fig. 1 ⁴He-³He diagram of quartz veins in the CCSD and quartz crystals in the Donghai area

●-quartz veins in CCSD eclogites; ○-quartz in the retrograde metamorphosed quartz eclogites; ■-quartz veins in the CCSD gneiss; □-quartz veins in CCSD amphibolite or amphibole schist; ▲-quartz in the outcropped eclogites in the Donghai area; △-quartz vein in the outcropped eclogites; + -quartz crystal in the Donghai area; × -microcline in the CCSD quartz microcline veins. The sources of various He after Mamyryn, 1984.

³He/⁴He, 本文取 1.4×10^{-6} 绝大多数低于 0.5, 而 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 较高, 且变异较大, 多数高于 2000, 最高可达 25844.4; (2) 东海水晶流体包裹体的³He/⁴He 变化很大, R/Ra 为 0.84 ~ 122, 而⁴⁰Ar/³⁶Ar 相对较为一致, 为 4859.3 ~ 8952.4; (3) 东海地表榴辉岩中石英脉的流体包裹体惰性气体同位素组成与水晶类似, R/Ra 和⁴⁰Ar/³⁶Ar 分别为 1.92 和 5731.6; (4) 除个别样品外, CCSD 石英脉和东海水晶样品的²⁰Ne/²²Ne 绝大多数低于大气值(9.8), 而¹²⁸Xe/¹³²Xe 普遍高于大气值(7.14)。

3.1 He-Ar 同位素体系

地质体中的 He 主要有 4 种来源, 原始 He、地幔 He、大气 He 和地壳 He, 它们各自的³He/⁴He 比值有较大的差别(图1)。在⁴He-³He 图(图1)上, 可见 CCSD 中各类样品主要落在地壳 He 和大气 He 之间, 但多数靠近地壳 He, 而远离地幔 He, 显示其中流体包裹体主要由大气饱和水和地壳流

体组成, 地幔流体的比例很低。然而地表榴辉岩中石英颗粒和石英脉以及东海水晶多数落在地幔 He 的附近, 甚至初始 He 的范围内, 其原因可能在于靠近地表样品长时间接受富含³He 的宇宙射线的照射有关。

大量前人研究资料显示, 地质体中不同来源的地质流体³He/⁴He 和⁴⁰Ar/³⁶Ar 有较大的区别, 如: 1. 大气饱和水(ASW), 主要包括大气降水和海水表层水等, 其特征性³He/⁴He 和⁴⁰Ar/³⁶Ar 同位素组成分别为 1R_a 和 295.5; 2. 深源地幔流体, 其特征性³He/⁴He 和⁴⁰Ar/³⁶Ar 值分别应为 6 ~ 9R_a 和 >40000, 但后者变化较大; 3. 地壳流体, 主要包括变质水、建造水或盆地热卤水等, 其特征性³He/⁴He 和⁴⁰Ar/³⁶Ar 组成分别应为 0.01 ~ 0.05R_a 和 > 295.5 (Burnard *et al.*, 1999); 4. 现代海底热水, 其典型³He/⁴He 和⁴⁰Ar/³⁶Ar 大致为 2.2 ~ 13.3R_a 和 287 ~ 359 (曾志刚等, 2000; Winckler *et al.*, 2001). 在 R/Ra-⁴⁰Ar/³⁶Ar 关系图上(图2), 可见大多数样品落在地壳流体(C)、大气饱和水(ASW)和地幔流体(M)范围之间, 但绝大多数 CCSD 中石英脉样品落点非常靠近地壳流体(C)范围, 而水晶和地表榴辉岩由于较高的³He/⁴He 而靠近地幔流体范围。特别值得注意的是退变质石英榴辉岩中的石英颗粒和个别长英质脉体中的微斜长石具有极低的 R/Ra 比值, 而落在地壳流体(C)之下。

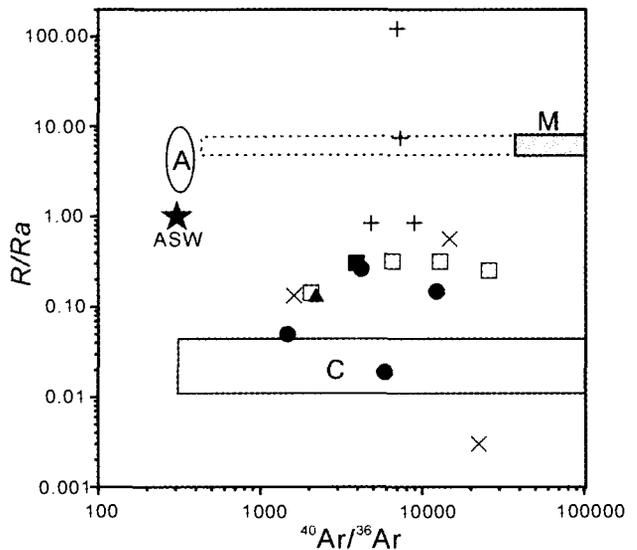


图2 CCSD 石英脉和东海水晶⁴⁰Ar/³⁶Ar-R/Ra 图

图中: ASW-为大气饱和水; A-为红海和大西洋中脊 TAG 地区海底热水范围(据 Winckler *et al.*, 2001; 曾志刚等, 2001); M-为地幔流体范围; C-为地壳流体范围。样品符号与图1同。

Fig. 2 ⁴⁰Ar/³⁶Ar vs. R/Ra diagram of the quartz veins in the CCSD and quartz crystals in the Donghai area.

ASW-air saturated water; A-submarine hydrothermal fluids of Rea Sea and TAG in Mid-Atlantic ridge (after Winckler *et al.*, 2001; Zeng *et al.*, 2001); M-mantle-derived fluids; C-crustal fluids. The sample symbols are same as Fig. 1.

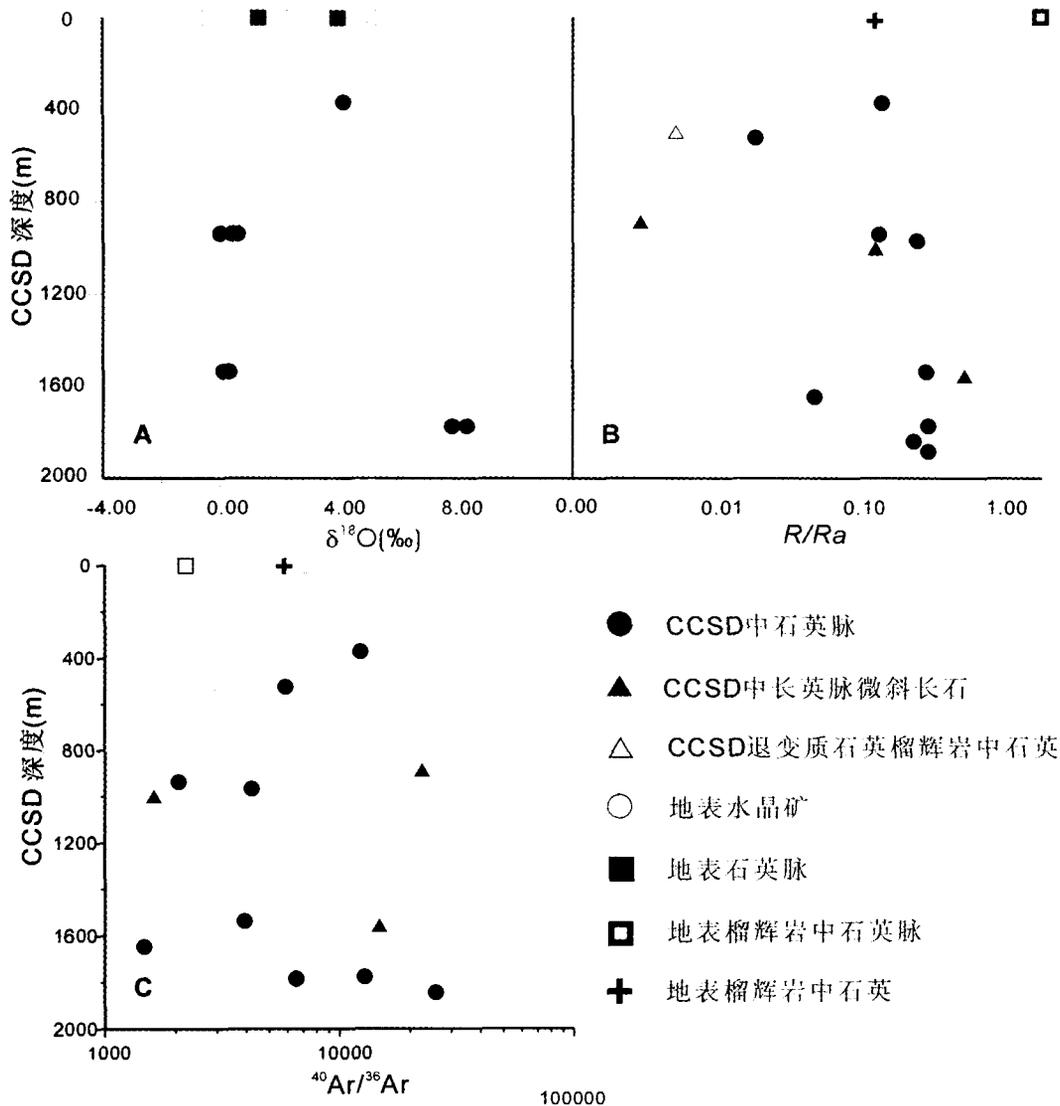


图3 CCSD 深度(m)与其中石英脉和东海水晶 $\delta^{18}\text{O}$ (A)、 R/Ra (B)和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (C)关系图。

Fig. 3 Depth (m) of the CCSD vs. $\delta^{18}\text{O}$ (A), R/Ra (B) and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (C) of the CCSD quartz veins and quartz crystals in the Donghai area.

徐莉等(2006)对CCSD中石英脉及东海水晶的流体包裹体 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 组成进行了研究,发现在CCSD纵向上,石英脉 $\delta^{18}\text{O}$ 组成呈现有规律“ Σ ”形变化,分别在900m~1500m和2700m出现极低值,而在1770m和4000m出现高正值,他们解释为CCSD部分变质岩围岩在板块俯冲前曾在地表与大气降水发生程度不同的水/岩反应,而石英脉继承了其各自寄主变质岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成。图3可见,在CCSD 0~2000m范围内,石英脉或长英脉流体包裹体的 R/Ra (2B)除个别样品外,没有明显的变化趋势,但 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (2C)比值在900~1500m之间呈现明显下降趋势,而在1600m左右开始上升,与CCSD石英脉流体包裹体 $\delta^{18}\text{O}$ 组成变化(2A)类似,同时也类似于CCSD中HP-UHP岩石矿物的原位 $\delta^{18}\text{O}$ 测定结果(张泽明等,2004b)。

张泽明等(2004a)将CCSD 100~2050m划分成7个单元,其中第6单元(1160~1600m)主要由正变质的长英质片麻岩组成,夹少量榴辉岩或薄层斜长角闪岩,其中矿物如白云母、长石、黑云母、石英、角闪石、绿帘石、绿辉石和石榴石等的原位 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素测定显示 $\delta^{18}\text{O}$ 在1000m左右深度出现最低值,他们认为第6单元的原岩是一晚元古代的花岗岩体(刘福来等,2004),该岩体为表壳岩与大气降水之间水/岩反应提供了热源,并导致岩体与围岩接触带上发生了最强烈的水/岩交换作用(张泽明等,2004a)。CCSD石英脉流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 在900~1500m间的下降,说明该段岩石中含有较高的大气He,也从另一侧面证实其原岩曾与大气降水发生过充分的同位素交换。CCSD石英脉与其围岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 同步变异,显示这些石英脉基本是原位形成的,在

板块折返减压过程中,并没有大规模的流体活动。至于 CCSD 石英脉中变化不大的³He/⁴He 组成,其原因可能是 He 的扩散能力很强,在较高温度下很容易与周围地质体达到同位素平衡,导致其围岩中大气 He 的信息被减弱。

3.2 Ne 同位素体系

不同来源的 Ne 的同位素组成有较大的差别:大气中 ²⁰Ne/²²Ne 为 9.8, ²²Ne/²²Ne 为 0.029;原始(太阳风)Ne 的 ²⁰Ne/²²Ne 和 ²²Ne/²²Ne 分别为 13.5 ~ 14.0 和 0.0305 ~ 0.034,地幔 Ne 的同位素组成与原始 Ne 相似;地幔流体的 ²⁰Ne/²²Ne 和 ²²Ne/²²Ne 分别为 9.8 ~ 13.2 和 0.058 ~ 0.068,而地壳中 Ne 的 ²⁰Ne/²²Ne 和 ²²Ne/²²Ne 组成分别为 0 ~ 0.3 和 0.1 ~ 0.47 (Hilton *et al.*, 2002),且不同来源的 Ne 具有不同的演化趋势(图 4)。图 4 可见,CCSD 中石英脉或长英质脉以及东海水晶的 ²⁰Ne/²²Ne 和 ²²Ne/²²Ne 变化范围均不大,主要落在大气和地壳演化线附近,而相对远离地幔 Ne,亦未见地幔 Ne 演化线所特有的 ²⁰Ne/²²Ne 与 ²²Ne/²²Ne 之间的正相关性,表明本次所测样品中的 Ne 主要来自地壳流体和大气饱和水。

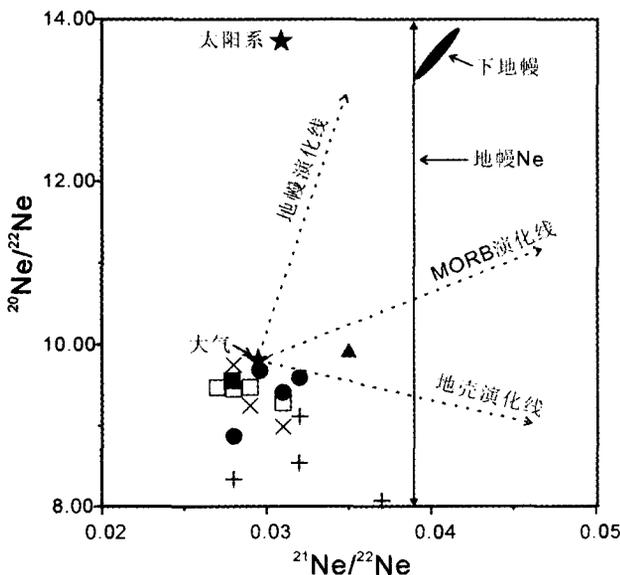


图 4 CCSD 石英脉和东海水晶 ²²Ne/²²Ne - ²⁰Ne/²²Ne 图 (据 Hilton *et al.*, 2002 改编)。图例同图 1。

Fig. 4 ²²Ne/²²Ne vs. ²⁰Ne/²²Ne diagram of the CCSD quartz veins and quartz crystals in the Donghai area. The sample symbols are same as Fig. 1. Modified after Hilton *et al.*, 2002.

3.3 Xe 同位素体系

与 Ne 同位素组成相似,不同来源的 Xe 同位素也有较大的区别:地壳 Xe 的 ¹²⁹Xe/¹³⁰Xe 变化很小,而 ¹³⁴Xe/¹³⁰Xe 变化很大,因此在 ¹²⁹Xe/¹³⁰Xe - ¹³⁴Xe/¹³⁰Xe 图上呈一条垂线(图 5),而地幔 Xe 的 ¹²⁹Xe 高于地壳, ¹³⁴Xe 低于地壳,故 ¹²⁹Xe/¹³⁰Xe

和 ¹³⁴Xe/¹³⁰Xe 之间呈现正相关关系(Thomas and Claude, 1982)。图 5 可见,CCSD 中石英脉和东海水晶除个别点落在地幔演化线上外,多数样品的流体包裹体落在大气和地壳 Xe 演化线上,也显示其中的 Xe 主要来自大气和地壳流体。

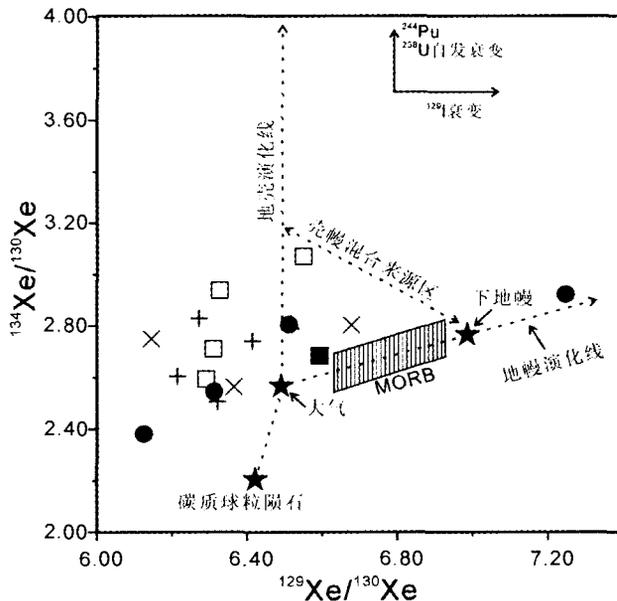


图 5 CCSD 石英脉和东海水晶 ¹²⁹Xe/¹³⁰Xe - ¹³⁴Xe/¹³⁰Xe 图 图例同图 1(据 Thomas and Claude, 1982 改编)

Fig. 5 ¹²⁹Xe/¹³⁰Xe vs. ¹³⁴Xe/¹³⁰Xe diagram of CCSD quartz veins and crystals in Donghai area. The sample symbols are same as Fig. 1. (Modified after Thomas and Claude, 1982).

4 成因信息

苏鲁超高压变质带 HP-UHP 岩石中广泛出露条带状或脉状石英集合体,关于其成因有不同见解:郑永飞(2004)在系统的野外观测和同位素地球化学分析基础上,认为这些石英脉主要是在板块折返过程中介于超高压与高压榴辉岩相之间的某一 P-T 条件下形成的,它们并未经历过超高压峰期变质作用,但明显是在高压榴辉岩相重结晶作用之前形成的,因此属于 HP 变质而不是 UHP 变质产物;而李一良等(2001)则提出这些石英脉明显是后期外来流体穿插插入形成;徐莉等(2005)在较系统的显微测温基础上,提出 CCSD 中榴辉岩中的石英脉主要形成于 UHP 岩石在折返过程中的减压重结晶和退变质,而片麻岩中石英脉则主要来源于角闪岩相及其后期退变质作用。本次完成的 CCSD 中石英脉流体包裹体惰性气体同位素分析再次证实了石英脉或长英质脉体是在地壳环境下形成的,其成矿流体主要由地壳变质流体和少量大气饱和水组成,而地幔流体比例很低,因此,它们应主要形成于板块俯冲之后折返到浅部地壳时的压力降低和流体释放过程。压力的降低,使得 UHP 岩石中石榴石、绿辉石、金红石等名义上无水矿物中的羟基溶解度下降,从

而释放出大量 H_2O (Lu *et al.*, 1997; Withers *et al.*, 1998; 郑永飞, 2004), 并与寄主矿物间进行水/岩反应, 形成变质流体, 同时, UHP 中的硬柱石分解为蓝晶石 + 黝帘石/斜黝帘石 + 石英/柯石英, 或者硬柱石 + 钠长石/硬玉分解为钠云母 + 黝帘石/斜黝帘石 + 石英/柯石英 (郑永飞, 2004), 此过程可释放出大量呈胶体状态溶解于变质流体中 SiO_2 (Grevel *et al.*, 2001)。溶解了 SiO_2 胶体的变质流体向由于板块折返和压力下降所导致的裂隙等构造薄弱部位流动, 因温压降低等原因而导致 SiO_2 胶体的沉淀和石英脉的形成。变质流体在流动和水/岩反应过程中, 混合了部分 HP-UHP 岩石中的大气饱和水。从惰性气体同位素组成看, 东海水晶和地表石英脉除了部分样品可能由于宇宙射线的照射所导致的 R/Ra 偏高外, 其它方面均很相似, 表明它们与 CCSD 石英脉具有类似的成因, 但其形成环境可能位于更为宽阔的岩石裂隙中。

从图 3 可知, CCSD 石英脉的同位素组成对其围岩有较好的继承性, 因此 CCSD HP-UHP 岩石的流体中也应基本不含地幔组分, 作者等对 CCSD 变质岩中造岩和副矿物流体包裹体惰性气体同位素的直接测定也证实了此点 (另文详述)。但这个现象是否意味着 CCSD 中榴辉岩没有被俯冲到地幔深度? 显然值得讨论。李善芳等 (2005) 对大别山地区榴辉岩中矿物 He 同位素组成的测定也发现其中基本不含地幔 He, 从而提出大别-苏鲁地区的超高压变质岩主要是在地壳环境下形成的, 其原岩并未被俯冲到地幔深度。吕古贤等 (2000) 利用透射电镜 (TEM) 对大别山含柯石英的榴辉岩石榴石中的显微构造进行了研究, 提出该区榴辉岩主要形成于 32Km 左右深度的地壳环境, 认为在构造压力附加的情况下, UHP 岩石中的柯石英和金刚石完全可以在地壳内产生。但我们认为, 苏鲁-大别地区 UHP 岩石的形成深度固然可以讨论, 但完全否认板块俯冲和折返的存在可能并不妥当。CCSD 中绝大多数榴辉岩并没有受到构造变形的迹象, 因此其中普遍存在的柯石英和矿物出溶体应当主要形成于地幔深度。而 CCSDHP-UHP 岩石及其石英脉中基本不含地幔流体的事实只是从另一个方面证实大别-苏鲁地区曾经历的板块俯冲和折返过程非常快速, 在超高压条件下, 地幔流体难以进入榴辉岩, 同时壳幔物件交换未能充分进行。

5 结论

(1) CCSD 石英脉和东海水晶的 He-Ar, Xe 和 Ne 同位素组成均清楚显示其中流体包裹体主要由地壳变质流体和大气饱和水组成, 基本不含深源地幔流体;

(2) CCSD 900 ~ 1500m 深度的石英脉流体包裹体出现 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 和 $\delta^{18}O$ 同步下降, 与 HP-UHP 岩石的矿物原位 $\delta^{18}O$ 测定结果相似, 说明该段岩石原岩在板块俯冲前曾与大气降水发生较为充分的水/岩反应, 石英脉继承了围岩的同位素组成特征。

(3) 从流体包裹体惰性气体组成看, CCSD 中石英脉和东海水晶可能具有相似的成因, 它们均主要形成于 HP-UHP 岩石在板块折返到地壳中的压力降低和流体释放过程, 但其围岩可能曾俯冲到地幔深度。CCSD HP-UHP 岩石及其石英脉中基本不含地幔流体的原因在于本区印支期快速的俯冲和折返过程。此外, 退变质作用及其伴生的地壳流体也使得 HP-UHP 岩石中的地幔流体信息进一步减弱。

致谢 蔡慈女士、邹永兴先生和陈世忠博士在作者对 CCSD 采样过程中给予了大力支持, 兰州地矿所气体地球化学国家重点实验室叶叶仁博士协助进行了样品测试, 在此一并深表谢忱!

References

- Ballentine CJ, Burgess R and Marty B. 2002. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. In: Porcelli *et al* (ed). Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol. 47, Washington: 539 - 614
- Baptiste PJ and Fouquet Y. 1996. Abundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at 13°N. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 87 - 93
- Burnard PG, Hu Ruizhong, Turner G, *et al.* 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 1595 - 1604
- Cao ZM, Zheng JB, Li YG, Ren JG, Xu SJ, Wang RC, Shoji T, Kaned H and Kabayashi S. 2002. Geologic and geochemical features of the volatile-rich ore fluid and its tracing and dating in the Xuebaoding Beryl-Scheelite Vein Deposit, China. *Science in China (Series D)*, 45(8): 719 - 729 (in Chinese)
- Graham DW. 2002. Noble gas isotope geochemistry of mid-ocean ridge and ocean island basalts: characterization of mantle source reservoirs. In: Porcelli *et al* (eds.). Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol. 47, Washington: 247 - 317
- Grevel KD, Schoenitz M, Skrok V *et al.* 2001. Thermodynamic data of lawsonite and zoisite in the system $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ based on experimental phase equilibria and calorimetric work. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 142: 298 - 308
- Hilton DR, Fischer TP, and Marty B. 2002. Noble gases and volatile recycling at subduction zones. In: Porcelli *et al* (eds.). Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol. 47, Washington: 319 - 370
- Hou ZQ, Li YH, Ai YD, Zhang QL, and Tang SH. 1999. Mantle helium in submarine hydrothermal system in the Okinawa trough: He-Ne isotope evidence. *Science in China (Series D)*, 29: 285 - 292 (in Chinese)
- Hu RZ and Bi XW. 1999. He and Ar isotope geochemistry of ore-forming fluid in Ailaoshan gold metallogenic belt. *Science in China (series D)*, 29(4): 321 - 330 (in Chinese)
- Hu RZ, Bi XW, Turner G *et al.* 1997. He-Ar isotopic systematics of fluid inclusions in pyrite from Machangqing copper deposit, Yunnan, China. *Science in China (series D)*, 27(6): 503 - 508 (in Chinese)
- Li SF, Li YH, Ding TP, Wu ZH and Gu PD. 2005. Helium isotope compositions and forming conditions of UHP metamorphic eclogites from the Dabie Mts. Terrane in East China. *Geological Review*, 51

- (3): 243-249 (in Chinese with English abstract)
- Li YH, Li JC and Song HB. 1999. A comparative study of helium isotope of polymetallic nodules and cobalt crusts. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(4): 378-384 (in Chinese with English abstract)
- Li YL, Zheng YF and Fu B. 2001. Oxygen isotope study on the quartz veins of eclogite in Dabie Mountains. *Science In China (series D)*, 31(4): 305-314 (in Chinese)
- Liu FL, Xu ZQ, Yang JS *et al.* 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and adjacent area. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9-20 (in Chinese with English abstract)
- Lu GX, Chen J, Ding TP, Li XB and Liu RX. 2000. On the depth of the formation of coesite bearing eclogite of Dabie UHPM zone, Central China. *Journal of Geomechanics*, 6(3): 14-24 (in Chinese with English abstract)
- Lu R and Keppeler H. 1997. Water solubility in pyrope to 100 kbar. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 129: 35-42
- Mao JW, Kerrich R and Li HY. 2002. High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in the Wangu gold deposit, Hunan province, China: Implications for mantle fluids along the Tanlu deep fault zone. *Geochemical Journal*, 36: 197-208
- Mao JW, Li YQ, Goldfarb R *et al.* 2003. Fluid inclusion and noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei province: A mantle connection for mineralization? *Economic Geology*, 98(3): 517-534
- Moreir M, Blusztajn J, Curtice J *et al.* 2003. He and Ne isotopes in oceanic crust; implications for noble gas recycling in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 216: 635-643
- Shen K, Zhang ZM, Sun XM *et al.* 2005. Composition and evolution of ultrahigh-pressure metamorphic fluids; a fluid inclusion study of the drill core from the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling Program. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 489-504 (in Chinese with English abstract)
- Simmons SF, Sawkins FJ, and Schullter DJ. 1987. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits. *Nature*, 329: 429-432
- Stuart FM, Burnard P, Taylor RP *et al.* 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluid: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralisation, South Korea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 4663-4673
- Sun XM, Norman DI, Sun K *et al.* 1999. N_2 -Ar-He systematics and source of ore-forming fluid in Changkeng Au-Ag deposit, Central Guangdong, China. *Science in China (series D)*, 42(5): 474-481
- Sun XM, Wang M, Xue T *et al.* 2004. He-Ar Isotopic Systematics of fluid inclusions in pyrites from PGE-polymetallic deposits in Lower Cambrian black rock series, South China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 78(2): 471-475
- Sun X M, Xiong D X, Wang S W *et al.* 2006. Noble gases isotopic composition of fluid inclusions in scheelites collected from Daping gold mine, Yunnan Province, China, and its metallogenic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 725-732 (in Chinese with English abstract)
- Sun X M, Xu T, He G W *et al.* 2006b. Noble gases isotopic composition of Cobalt-rich ferromanganese crusts from Western Pacific Ocean and its geological Significances. *Acta Geologica Sinica*, (in press)
- Tang Q, Sun XM, Xu L, Zhai W, Liang JL, Liang YH and Shen K. 2006. Discovery of iron oxide, monazite and barite exsolutions in apatite veins in eclogite from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1915-1920
- Tang Q, Sun XM, Xu L, Zhai W, Liang JL, Liang YH and Shen K. 2006. U-Th-Pb Chemical dating of monazite exsolutions in apatite aggregates in quartz veins of UHP rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1927-1932
- Thomas S, and Claude JA. 1982. Terrestrial xenology, *Earth and Planetary Science Letters*, 60: 389-406
- Winckler G, Aeschbach-Hertig W, Kipfer R *et al.* 2001. Constraints on origin and evolution of Red Sea brines from helium and argon isotopes. *Earth Planet. Sci. Let.*, 184: 671-683
- Withers AC, Wood BJ and Carroll MR. 1998. The OH content of pyrope at high pressure. *Chemical Geology*, 147: 161-171
- Xu L, Sun XM, Zhai W, Liang YH, Liang JL, Shen K, Zhang ZM and Tang Q. 2005. Preliminary studies of fluid inclusions in quartz veins of HP-UHP metamorphic rocks, CCSD. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 505-512 (in Chinese with English abstract)
- Xu L, Sun XM, Zhai W, Liang YH, Tang Q, Liang JL, Zhang ZM and Shen K. 2006. $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ compositions of fluid inclusions in quartz veins of HP-UHP rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and its geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 2009-2017
- Xue CJ, Chen YC, Wang DH, *et al.* 2003. The Jinding and Baiyangping deposits, Westnorthern Yunnan: Geological feature, He, Ne and Xe isotope compositions, and metallogenic epoch. *Science in China (D)*, 33(4): 315-322 (in Chinese)
- Ye XR, Wu MB and Sun ML. 2001. Determination of the noble gas isotopic composition in rocks and minerals by mass spectrometry. *Rock and Mineral Analysis*, 20(3): 174-178 (in Chinese with English abstract)
- Zeng ZG, Qin YS and Zhai SK. 2001. He, Ne and Ar isotope compositions of fluid inclusions in hydrothermal sulfides from the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. *Science in China (series D)*, 44(3): 221-228
- Zhang ZM, Shen K, Xiao Y, van den Kerkhof AM, Hoefs J and Liou JG. 2005. Fluid composition and evolution attending UHP metamorphism; Study of fluid inclusions from drill cores, southern Sulu belt, eastern China. *Inter. Geol. Rev.*, 47: 297-309
- Zhang ZM, Xu ZQ, Liu FL *et al.* 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~2050m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27-42 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Xiao YL, Hoefs J *et al.* 2004a. The fluid-rock interaction of UHP metamorphism: Oxygen isotopic of the core rocks from the main hole (100~2050m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 23(4): 289-297 (in Chinese with English abstract)
- Zhao KD, Jiang SY, Xiao HQ *et al.* 2002. Origin of ore-forming fluids of the Dachang Sn-polymetallic ore deposit: Evidence from helium isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 47(12): 1041-1045
- Zheng YF, 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
- Zheng YF. 2004. Fluid activities during the exhumation of deep-subducted continental plates. *Chinese Science Bulletin*, 49(10): 917-929 (in Chinese)

附中文参考文献

- 曹志敏, 李佑国, 任建国, 李保华, 徐士进, 王汝成, 正路激也, 金田博彰, 小林祥一. 2002. 雪宝顶绿柱石-白钨矿矿床富挥发成分成矿流体特征及其示踪与测年, *中国科学(D)*, 32(1): 64-72
- 侯增谦, 李延河, 艾永德, 张琦玲, 唐绍华. 1999. 冲绳海槽海底活动热水成矿系统中的地幔氦: 氮-氦同位素证据. *中国科学*, 29:

285 - 292

- 胡瑞忠, 毕献武, Turner G 等. 1997. 云南马厂箐铜矿黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系. 中国科学(D 辑), 27(6): 503 - 508
- 胡瑞忠, 毕献武. 1999. 哀牢山成矿带成矿流体的 He 和 Ar 同位素地球化学. 中国科学(D 辑), 29(4): 321 - 330
- 李善芳, 李延河, 丁梯平, 伍宗华, 古平等. 2005. 大别山超高压变质榴辉岩的氩同位素组成及其形成环境的制约. 地质论评, 51(3): 243 - 249
- 李延河, 李金城, 宋鹤彬. 1999. 海底多金属结核和富钴结壳的 He 同位素对比研究. 地球学报, 20(4): 378 - 384
- 李一良, 郑永飞, 傅斌. 2001. 大别山榴辉岩中石英脉的氧同位素研究. 中国科学 D 辑, 31(4): 305 - 314
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别. 岩石学报, 20(1): 9 - 20
- 吕古贤, 陈晶, 丁梯平, 李晓波, 刘瑞珣. 2000. 含柯石英榴辉岩形成深度的构造校正测算. 地质力学学报, 6(3): 14 - 24
- 沈昆, 张泽明, 孙晓明等. 2005. 超高压变质流体的组成与演化: 中国大陆科学钻探工程主孔岩心的流体包裹体研究. 岩石学报, 21(02): 489 - 504
- 孙晓明, Norman D I, 孙凯等. 1999. 粤中坑金银矿流体 N₂-Ar-He 示踪体系及来源. 中国科学, 29(3): 241 - 246
- 孙晓明, 熊德信, 王生伟, 石贵勇, 翟伟. 2006. 云南大坪金矿白钨矿惰性气体同位素组成及其成矿意义. 岩石学报, 22(3): 725 - 732
- 孙晓明, 王敏, 薛婷等. 2003. 华南下寒武统黑色岩系铂多金属矿中黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系及其矿床成因意义. 高校地质学报, 9(4): 661 - 666
- 徐莉, 孙晓明, 翟伟等. 2005. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 高压超高压变质岩中石英脉流体包裹体初步研究. 岩石学报, 21(2): 505 - 512
- 汤倩, 孙晓明, 徐莉等. 2006. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 榴辉岩磷灰石脉体中铁的氧化物、重晶石、独居石和黄铁矿出溶物的发现及其意义. 岩石学报, 22(7): 1915 - 1920
- 徐莉, 孙晓明, 翟伟, 梁业恒, 汤倩, 梁金龙, 张泽明, 沈昆. 2006. 中国大陆科学钻探 (CCSD) HP-UHP 变质岩中石英脉流体包裹体 δD - $\delta^{18}O$ 同位素组成及其意义. 岩石学报, 22(7): 2009 - 2017
- 薛春纪, 陈毓川, 王登红等. 2003. 滇西北金顶和白秧坪矿床: 地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代. 中国科学(D 辑), 33(4): 315 - 322
- 叶先仁, 吴茂炳, 孙明良. 2001. 岩矿样品中稀有气体同位素组成的质谱分析. 岩矿测试, 20(3): 174 - 180
- 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 2000. 大西洋中脊 TAG 热液区硫化物中流体包裹体的 He-Ne-Ar 同位素组成. 中国科学(D 辑), 30(6): 628 - 633
- 张泽明, 肖益林, Hoefs J. 2004a. 超高压变质作用过程中的流体-岩石相互作用 - 中国大陆科学钻探工程主孔 (0 ~ 2050m) 岩心的氧同位素证据. 岩石矿物学杂志, 23(4): 289 - 297
- 张泽明, 许志琴, 刘福来等. 2004b. 中国大陆科学钻探工程主孔 (100 ~ 2050m) 榴辉岩岩石化学研究. 岩石学报, 20(1): 27 - 41
- 赵葵东, 蒋少涌, 肖红权, 倪培. 2002. 大厂锡-多金属矿床成矿流体来源的 He 同位素证据. 科学通报, 47(8): 632 - 635
- 郑永飞. 2004. 深俯冲大陆板块折返过程中的流体活动. 科学通报, 49(10): 917 - 929