

超高压榴辉岩金红石中高场强元素变化的控制因素及其地球动力学意义

高长贵, 刘勇胜*, 宗克清, 陈海红, 胡兆初

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 利用 LA-ICP-MS 对 CCSD-MH 超高压榴辉岩中金红石进行了详细的原位微区微量元素组成分析。金红石中高场强元素 Nb 和 Ta 含量主要受全岩 Nb、Ta 和 TiO_2 含量控制, Zr、Hf 含量比较稳定基本不受全岩含量影响。粒间金红石中, 同一颗粒金红石核部 Zr 含量系统高于边部, 而边部则出现了明显的 Pb 和 Sr 富集特征。CCSD-MH 榴辉岩中金红石与全岩的 Nb/Ta 比值呈现明显的不一致性。全岩 Nb/Ta 比值明显低于金红石且与全岩 TiO_2 含量负相关, 而金红石的 Nb/Ta 比值与全岩 Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值没有明显的相关关系。金红石和全岩之间非完全耦合的 Nb/Ta 组成表明, 金红石并非形成于原岩的结晶过程中而是在超高压变质作用过程中形成, 尽管金红石是榴辉岩中 Nb、Ta 含量的主要载体矿物, 但金红石的 Nb/Ta 比值并不一定能完全代表全岩的特征, 而与全岩 Nb、Ta 和 TiO_2 的含量有关。粒间金红石核部 Zr 含量所记录的温度与粒径之间具有明显的正相关性, 反映金红石中的 Zr 在其形成后没有封闭。粒间金红石所表现出的明显的边部富集 Pb 和 Sr 的特征, 反映了后期流体活动对金红石组成的影响。这些研究结果为金红石中 Zr 在高温下的扩散作用和后期流体活动的影响提供了重要证据, 这可能是利用金红石 Zr 含量地质温度计计算的苏鲁—大别榴辉岩变质温度(598~827 °C)偏低的主要原因。

关键词: CCSD-MH; 榴辉岩; 金红石; 微量元素; Nb/Ta 比值。

中图分类号: P588.3

文章编号: 1000-2383(2008)04-0487-17

收稿日期: 2007-10-29

Distributions and Geodynamic Implications of High Field Strength Elements in Rutile from Ultrahigh Pressure Eclogites

GAO Chang-gui, LIU Yong-sheng*, ZONG Ke-qing, CHEN Hai-hong, HU Zhao-chu

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Trace element compositions of rutiles in eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) main hole were analyzed using LA-ICP-MS. The results indicate that Nb and Ta contents of rutiles are significantly controlled by whole rock compositions, while Zr and Hf show no obvious dependence on the whole rock compositions. Coupled with enrichments of Pb and Sr at the rim of the interstitial rutiles, Zr contents decrease from the core to the rim. Nb/Ta ratios of rutiles are much higher than those of the parent eclogites. Moreover, Nb/Ta ratios of rutile show no correlation with Nb and Ta concentrations and Nb/Ta ratios of the parent eclogites, while Nb/Ta ratios of eclogites correlate negatively with the TiO_2 contents. These observations suggest that rutiles were metamorphic products of the Triassic ultrahigh pressure (UHP) metamorphism, rather than formed by crystallization in equilibrium with melt. The partially decoupling between rutiles and parent eclogites in terms of Nb/Ta ratios implies that although rutiles are the dominant carriers of Nb and Ta in eclogites, they might not completely reflect the Nb/Ta ratios of the parent eclogites, especially for low-Ti eclogites ($\text{TiO}_2 < 0.5\%$). Nb/Ta ratios of rutiles are dominated by the combination of Nb, Ta and TiO_2 contents of the parent eclogites. The positive

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(No. 2003CB716501); 国家自然科学基金项目(Nos. 40521001, 40673026); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0441); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET 05-0664).

作者简介: 高长贵(1983—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事微量元素地球化学研究。E-mail: gaochanggui@126.com

* 通信作者: 刘勇胜, E-mail: yshliu@cug.edu.cn; yshliu@vip.sina.com. Tel: 027-67885100-8312.

correlations between temperatures recorded by Zr contents and the size of rutile indicate that Zr in rutile was not immediately closed after rutile formation. On the other hand, the enrichments of Pb and Sr at the rim of the interstitial rutiles suggest influence of subsequent fluids on the compositions of rutiles, which could have affected Zr of the rutiles as well. This study provides the evidence for the Zr diffusion at a high temperature and fluid activity that could have contributed to the lower temperatures (598–827 °C) recorded by Zr-in-rutile for the eclogites from the Dabie-Sulu UHP terrane.

Key words: CCSD-MH; eclogite; rutile; trace element; Nb/Ta ratio.

金红石作为副矿物可以出现在从低级变质岩(如绿片岩)至高级变质岩(如榴辉岩)的各种类型的岩石中,是高场强元素 Nb、Ta、Zr 和 Hf 的主要载体矿物之一(Zack *et al.*, 2002). 金红石不仅会强烈富集 Nb 和 Ta ($D_{Nb, Ta} \gg 1$), 且会使 Nb 和 Ta 显著分异 ($D_{Ta} > D_{Nb}$) (Green and Pearson, 1987; Brenan *et al.*, 1994; Stalder *et al.*, 1998; Foley *et al.*, 2000, 2002; Green, 2000; Hornig and Hess, 2000; Schmidt *et al.*, 2004; Klemme *et al.*, 2005; Xiong *et al.*, 2005). 因此,金红石在解释大陆地壳和亏损地幔 Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值不平衡特征、岛弧火山岩微量元素组成上受到特别关注(Brophy and Marsh, 1986; Tatsumi and Nakamura, 1986; Morris *et al.*, 1990; Ringwood, 1990; Ulmer and Trommsdorff, 1995; Stalder *et al.*, 1998; Rudnick *et al.*, 2000; Audetat and Keppler, 2005). 另外,金红石还被利用其中的 Nb 和 Cr 含量判别含金红石榴辉岩的原岩性质(Zack *et al.*, 2002; 李晓峰等, 2005; 王汝成等, 2005; 陈振宇等, 2006a; 余金杰等, 2006), 利用 Zr 含量温度计(Zack *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2006) 计算金红石榴辉岩形成温度(王汝成等, 2005; 高天山等, 2006; Spear *et al.*, 2006; 余金杰等, 2006; 陈振宇等, 2006b; Miller *et al.*, 2007). Rudnick *et al.* (2000) 基于金红石的 Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值推测含金红石榴辉岩可能是补偿硅酸岩地球大陆地壳与亏损地幔之间 Nb/Ta 比值不平衡的储库. Xiao *et al.* (2006) 对大别—苏鲁超高压榴辉岩中金红石的研究认为, Nb 和 Ta 的分馏最可能发生在没有金红石形成条件下的蓝片岩向角闪榴辉岩相变过程中, 热板片释放的低 Nb/Ta 比值流体运移至冷板片被含金红石榴辉岩所保存导致了热板片区域榴辉岩具有高 Nb/Ta 比值. 这些研究大部分都是基于某些元素(如 Nb、Ta)在金红石中的高度相容性, 假设这些元素在金红石中的含量或比值可以代表全岩特征而进行的. 因此, 一个很重要的问题是金红石中这些元

素的含量或比值是否一定能够代表全岩特征? 什么条件下金红石中的 Nb/Ta 比值和全岩一致或不一致?

大别—苏鲁超高压变质地体是华北与扬子板块在三叠纪俯冲—碰撞作用的产物, 被认为是目前世界上已知的最大超高压变质带. 中国大陆科学钻探工程主孔(CCSD-MH) 位于江苏省东海县东南 17 km 的毛北村附近, 构造上位于苏鲁超高压变质带的南部. CCSD-MH 榴辉岩不同程度地出现了金红石或其他含钛矿物(许志琴, 2004; 张泽明等, 2004), 为系统研究超高压变质岩中金红石的形成机制及其对微量元素分馏的控制作用提供了良好的天然实验室. 陈晶等(2005) 发现与石榴石和绿辉石共生的金红石曾遭受过强烈的应力作用, 是在大陆板块俯冲或折返过程中形成的, 而石榴石和绿辉石中的微粒金红石包裹体则形成于大陆板块俯冲前或折返后的构造地质作用相对稳定期. 王汝成等(2005)、李晓峰等(2005)、余金杰等(2006) 以及高天山等(2006) 曾对大别—苏鲁榴辉岩中金红石的部分微量元素进行过测定, 通过金红石中 Zr 含量温度计得出的温度(608~787 °C) 整体低于用其他方法所估算的榴辉岩峰期变质温度(Wang *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 1994, 1995; Zhang *et al.*, 1996; Banno *et al.*, 2000; Yao *et al.*, 2000), 并推测导致偏低的原因可能是金红石中的 Zr 与锆石之间没有达到平衡, 或者是金红石中的 Zr 在退变质过程中由于重结晶作用和流体活动而发生了扩散, 或者这些金红石形成于超高压峰期变质作用之前. 那么, 导致上述温度估计值之间差异的原因究竟是什么? 已有的研究工作仅限于推测, 而没有给出很好的证据.

根据锆石 U-Pb 同位素定年所估计的大别—苏鲁超高压变质峰期年龄范围较宽(220~245 Ma; Hacker *et al.*, 1998; Ayers *et al.*, 2002; Wan *et al.*, 2005; 张泽明等, 2005; Liu *et al.*, 2006b; Zhao *et al.*, 2007). 利用榴辉岩中石榴石、绿辉石和金红石 Sm-Nd 等时线得出的超高压峰期变质年

龄则较低(226.3 ± 3.2 Ma; Li *et al.*, 2000), 而金 *al.*, 2003) 与普遍认为的角闪岩相退变质年龄一致
 红石 U-Pb 定年获得的年龄值(218 ± 1.2 Ma; Li *et* (<220 Ma; Zhao *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008).

表 1 CCSD-MH 榴辉岩全岩主、微量元素组成

Table 1 Major and trace element contents of the CCSD-MH eclogites

样品号	SD001	SD004	SD006	SD009	SD014	SD017	SD018	SD019	SD022	SD033
SiO ₂	57.47	51.66	51.59	45.08	46.55	44.33	38.69	48.47	49.39	47.02
TiO ₂	1.46	1.52	2.37	4.08	2.75	2.85	4.52	0.39	1.07	0.73
Al ₂ O ₃	15.06	13.05	14.49	15.21	15.36	13.96	11.98	13.23	14.68	17.14
TFe ₂ O ₃	11.25	13.05	14.46	16.54	16.48	15.34	24.47	10.99	12.33	11.16
MnO	0.34	0.19	0.28	0.24	0.23	0.23	0.26	0.16	0.17	0.17
MgO	1.96	5.76	4.12	7.37	5.29	7.15	7.30	12.42	7.88	9.50
CaO	5.14	10.10	7.74	9.03	9.36	12.05	11.11	9.85	10.99	9.67
Na ₂ O	5.73	3.95	3.12	2.21	3.63	2.96	1.28	3.76	2.98	2.42
K ₂ O	0.65	0.04	0.86	0.05	0.03	0.01	0.01	0.03	0.06	1.32
P ₂ O ₅	0.46	0.30	0.70	0.22	0.26	0.63	0.02	0.02	0.09	0.17
LOI	0.41	0.33	0.19			0.04		0.33	0.33	0.79
Total	99.93	99.95	99.92	100.00	99.93	99.54	99.64	99.65	99.97	100.09
V	31.00	352.00	235.00	325.00	429.00	323.00	900.00	111.00	370.00	267.00
Cr	2.40	21.30	4.18	39.30	22.50	203.00	29.40	550.00	161.00	376.00
Co	119.00	165.00	102.00	200.00	141.00	139.00	155.00	148.00	193.00	126.00
Ni	0.88	24.50	5.61	15.90	18.20	44.50	71.10	372.00	68.50	168.00
Cu	3.93	89.90	11.50	8.02	33.50	18.90	89.10	25.80	68.70	47.00
Zn	169.00	101.00	139.00	88.40	112.00	90.90	128.00	47.00	80.10	79.20
Ga	23.10	19.30	20.80	17.80	19.20	17.40	20.00	14.00	18.20	16.20
Rb	14.80	0.93	18.20	1.52	0.60	0.15	0.14	0.61	1.77	29.40
Sr	200.00	100.00	194.00	108.00	162.00	268.00	116.00	190.00	86.10	246.00
Y	63.40	38.30	61.00	14.40	43.20	24.00	12.40	41.20	28.50	25.20
Zr	295.00	70.70	137.00	10.10	73.80	26.70	10.00	90.70	56.50	39.00
Nb	9.91	4.91	6.65	0.87	6.14	1.85	0.43	3.11	2.40	1.90
Cs	0.61	0.02	0.55	0.02	0.05	0.01	0.02	0.09	0.15	1.06
Ba	147.00	108.00	349.00	9.70	18.20	15.90	31.30	55.00	76.00	565.00
La	18.10	29.30	24.90	2.17	12.30	4.87	0.78	3.01	2.89	17.50
Ce	48.70	82.10	68.50	5.52	29.60	13.30	2.23	10.60	8.63	39.40
Pr	6.29	10.30	8.91	0.76	3.49	2.00	0.35	1.53	1.29	4.31
Nd	31.10	44.80	42.80	4.10	16.60	10.70	2.28	7.77	7.20	18.30
Sm	7.74	8.49	10.20	1.27	4.29	3.09	1.16	2.43	2.91	3.42
Eu	3.25	2.40	3.79	0.67	1.53	1.31	0.71	0.67	0.97	1.03
Gd	7.77	6.25	9.53	1.84	5.40	3.54	1.61	3.05	3.82	3.14
Tb	1.44	1.00	1.61	0.38	0.98	0.62	0.31	0.67	0.69	0.52
Dy	10.40	6.75	10.70	2.71	7.03	4.33	2.15	5.37	4.73	3.95
Ho	2.29	1.42	2.14	0.51	1.45	0.89	0.43	1.31	1.00	0.89
Er	5.78	3.40	5.06	1.13	3.39	1.98	1.03	3.42	2.38	2.33
Tm	0.90	0.55	0.74	0.16	0.53	0.29	0.16	0.58	0.38	0.38
Yb	6.27	3.62	4.83	1.09	3.50	1.79	1.00	4.40	2.66	2.86
Lu	0.91	0.50	0.67	0.12	0.46	0.24	0.12	0.58	0.36	0.40
Hf	5.74	1.54	2.54	0.33	1.72	0.63	0.37	2.25	1.46	0.92
Ta	0.59	0.35	0.45	0.24	0.35	0.21	0.13	0.32	0.31	0.18
Pb	2.59	1.94	3.50	0.79	2.46	1.43	2.25	6.72	3.71	2.15
Th	1.07	1.80	2.53	0.13	1.43	0.25	0.14	0.21	0.22	2.05
U	0.37	0.47	0.51	0.06	0.61	0.06	0.05	0.12	0.23	0.19
Nb/Ta	16.70	13.90	14.70	3.70	17.60	8.71	3.36	9.86	7.70	10.50
Zr/Hf	51.30	45.90	53.90	31.20	42.90	42.10	26.80	40.40	38.70	42.50

注:主量元素单位是%,微量元素单位是 $\mu\text{g/g}$.

上述年龄差别暗示至少 Sm、Nd、U、Pb 在金红石形成后并没有封闭。那么金红石中的 Zr 是否也存在类似特征? 因此, 榴辉岩中金红石的形成作用及是否存在后期改造对于利用金红石准确判别榴辉岩原岩的性质和解释金红石所记录的温度都具有重要意义。

本文在利用 LA-ICP-MS 对 CCSD-MH 榴辉岩中金红石微量元素含量和 Nb/Ta 比值进行系统原位微区分析的基础上, 对上述问题进行了深入探讨。研究结果表明榴辉岩全岩 Nb/Ta 比值主要受控于其原岩的形成过程; 金红石的 Nb/Ta 比值并不一定代表全岩特征, 而取决于全岩 Nb、Ta 和 Ti 的含量; 尽管金红石主体形成于超高压变质作用峰期, 但由于高温下的扩散作用以及折返过程中可能的流体活动使金红石 Zr 含量温度计并不能完全记录超高压变质作用的温度。

1 研究样品与分析方法

在详细的岩相学工作基础上, 对所选择的 10 个榴辉岩样品进行了 ICP-MS 和 XRF 分析(表 1)。这些样品分别来自 CCSD-MH 100~1 100 m 不同深度和类型的榴辉岩中。其中 SD001、SD004、SD022 和 SD033 属于低 Mg-Ti 榴辉岩 ($\text{TiO}_2 < 2\%$), SD006、SD009、SD014、SD017 和 SD018 属于高 Ti 榴辉岩 ($\text{TiO}_2 > 2\%$), SD019 属于高 Mg 榴辉岩。主要矿物组合为石榴石+绿辉石±石英±多硅白云母, 副矿物以 Fe-Ti 氧化物、金红石、黄铁矿和磷灰石为主, 有时出现退变质矿物绿帘石和角闪石。榴辉岩中金红石分 2 种类型: (1) 位于石榴石或绿辉石内部的包裹体金红石; (2) 位于石榴石或绿辉石颗粒之间的粒间金红石。其中包裹体金红石含量相对较少, 绝大多数金红石分布于石榴石或绿辉石颗粒之间。

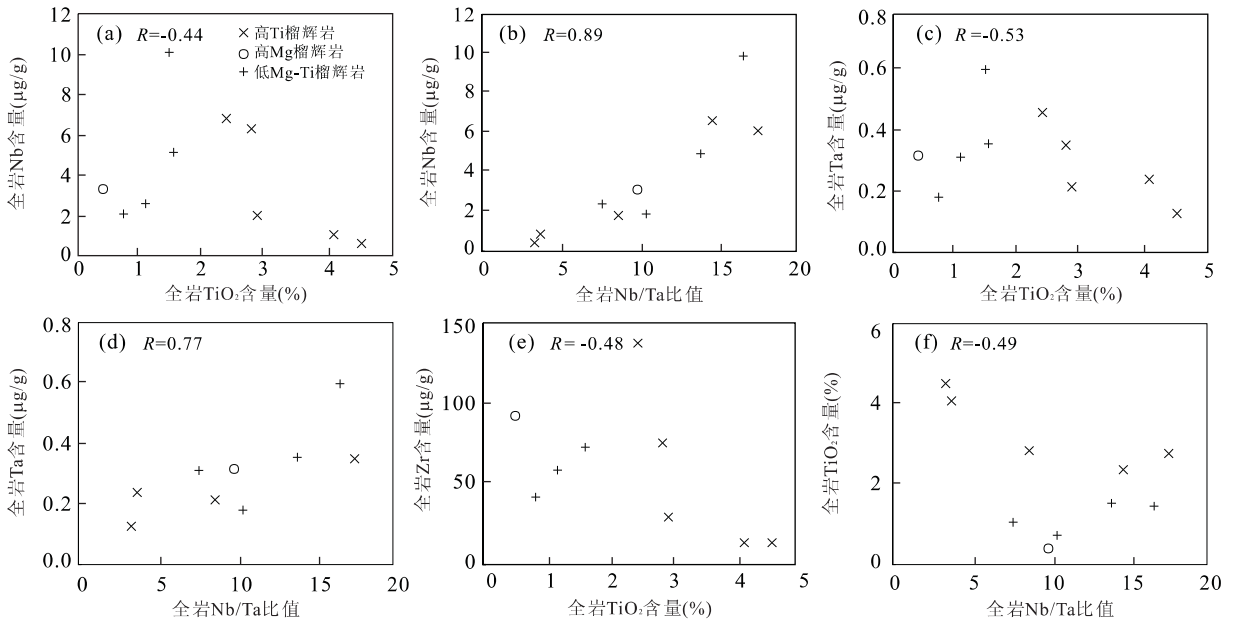
样品粉碎工作和全岩常量元素组成分析在西北大学地质系大陆动力学国家重点实验室完成。常量元素分析结果的精密度和准确度同 Rudnick *et al.* (2004)。全岩微量元素分析用中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室电感耦合等离子体质谱仪(Aglient 7500a ICP-MS)完成。用于微量元素分析的样品制备流程为: (1) 准确称取 50 mg 左右约 200 目的岩石粉末样品放入 Teflon 坩埚中, 加入 1.5 mL 高纯 HNO_3 摇匀后, 再加入 1.5 mL 高纯 HF 摇匀; (2) 把盛有样品和混合酸的 Teflon 坩埚

放入特制钢套中, 在高温(190 °C)密闭烘箱中溶解样品 48 h; (3) 把 Teflon 坩埚从钢套中取出后放在 110 °C 电热板上加热 3~4 h 直至样品蒸干; (4) 在已蒸干的样品中加入 1 mL 高纯 HNO_3 摇匀后再次蒸干; (5) 经过 2 次蒸干的样品冷却后加入 2 mL 高纯去离子水和 1 mL 高纯 HNO_3 , 摇匀后重新放回钢套中, 并在高温(190 °C)密闭烘箱中加热 24 h, 提取样品; (6) 把盛有样品提取液的 Teflon 坩埚从钢套中取出, 并用 2% HNO_3 将提取液在聚乙烯塑料瓶中定溶至 100 g 左右, 待测(为了避免 Nb、Ta 在稀硝酸介质中不稳定问题, 微量元素 ICP-MS 分析工作均在样品定容后 12 h 内完成)。

金红石原位微区微量元素分析由中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室的 LA-ICP-MS 完成, 激光剥蚀系统是配备有 193 nm ArF-excimer 激光器的 GeoLas 2005。分析采用的激光剥蚀孔径为 32 μm , 激光脉冲为 8 Hz, 能量为 80 mJ。电子探针(EMP)分析在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 分析仪器 JEOL733, 分析条件为: 加速电压 15 kV, 束流 20 nA。对于单颗粒金红石的微量元素测定, 首先在电子显微镜下对加厚(~100 μm)探针片进行观察, 将欲进行分析的单颗粒金红石进行标记, 然后对做好标记位置的金红石利用 LA-ICP-MS 进行微量元素含量分析。LA-ICP-MS 分析数据处理采用 NIST610 作外标、Ti 作内标元素, 利用 Glitter4.4 软件完成。其中 NIST610 微量元素含量使用的是 GeoReM(<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)在 2006 年给出的最新推荐值, 该推荐值纠正了以前 NIST610 推荐值中 Mn、Ta 含量偏低 12% 和 20% 的问题。为了对应进行 EMP 分析, 对经 LA-ICP-MS 剥蚀的金红石样品进行了轻微抛光以除去表面溅落的剥蚀颗粒。然后在激光剥蚀坑的附近利用 EMP 对金红石中 Ti 含量进行分析。

2 结果

CCSD-MH 榴辉岩主量元素 MgO 和 TiO_2 含量差别很大, 且高场强元素 Nb、Ta、Zr 和 Hf 的含量以及 Nb/Ta 比值与 TiO_2 含量具有负相关关系(图 1a、1c、1e、1f), 而 Nb/Ta 比值与 Nb、Ta 含量明显正相关(图 1b、1d)(相关系数 R 分别为 0.89 和 0.77)。高 Mg 榴辉岩全岩 MgO 和 Al_2O_3 的含量相

图 1 榴辉岩全岩 Nb、Ta、Zr 和 Hf 对 TiO_2 及 Nb/Ta 比值的变化Fig. 1 Plots of Nb, Ta, Zr and Hf versus TiO_2 and Nb/Ta ratios for eclogites

对很高,分别为 12.42%和 13.23%,但是 TiO_2 的含量却很低(0.39%)。Ni、Cr 含量也明显高于其他类型的榴辉岩,Nb、Ta、Zr 和 Hf 的含量以及 Nb/Ta 比值略高于高 Ti 榴辉岩,而与低 Mg-Ti 榴辉岩接近(图 1)。高 Ti 榴辉岩具有异常高的 TiO_2 (2.75%~4.52%) 和 TFe_2O_3 (15.34%~24.47%) 含量,而 MgO 的含量(5.29%~7.37%)明显低于高 Mg 榴辉岩(12.42%),却比低 Mg-Ti 榴辉岩(1.96%~5.76%)高。但是高 Ti 榴辉岩中高场强元素 Nb、Ta、Zr 和 Hf 含量以及 Nb/Ta 比值却明显较其他类型榴辉岩低很多(图 1)。低 Mg-Ti 榴辉岩 TiO_2 和 MgO 含量分别介于高 Ti 榴辉岩和高 Mg 榴辉岩之间,但是却具有最高的 Nb、Ta、Zr 和 Hf 含量以及 Nb/Ta 比值(图 1)。

金红石中微量元素含量在不同类型榴辉岩、同一类型榴辉岩不同金红石颗粒以及同一颗粒金红石的不同部位之间均有明显变化。V 和 Fe 是金红石中含量最高的微量元素(表 2)。其中 Fe 的含量在不同样品中相对较稳定,而 V 的含量在不同全岩类型的金红石之间变化范围较大。过渡元素 Sc、Cr、Cu、Zn、W、Mo 以及碱土金属元素 Mg 和 Al 在金红石中含量相对较高($1.2 \times 10^{-6} \sim 350 \times 10^{-6}$),而 Rb、Ba、Cs 和稀土元素(REE)等含量大部分在 LA-ICP-MS 检出限以下。Sr、Pb 在金红石中的含量相对较低,但金红石边部较核部明显富集 Pb、Sr(图

3a、3b)。

金红石中高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 含量非常富集。其中 Nb 和 Ta 含量主要受全岩 Nb、Ta 和 TiO_2 含量控制,与全岩 Nb、Ta 含量正相关(图 2a、2c)($R=0.87$ 和 0.86),与全岩 TiO_2 含量明显负相关($R=-0.67$ 和 -0.70)(图 2b、2d)。Nb/Ta 比值与全岩 Nb、Ta 含量没有明显相关性(图 2i),但是与全岩 TiO_2 含量负相关($R=-0.61$)(图 2f)。不同类型榴辉岩中金红石的 Nb/Ta 比值与其 Nb、Ta 含量明显正相关($R=0.96$ 和 0.94)(图 2g、2h)。同一样品中不同颗粒金红石之间的 Nb/Ta 比值与 Ta 含量明显负相关($R=-0.50 \sim -0.96$)(图 2g),但是 Nb/Ta 比值与 Nb 的关系比较复杂,低 Mg-Ti 榴辉岩金红石的 Nb/Ta 比值与其 Nb 含量正相关($R=0.54 \sim 0.70$)(图 2h),而高 Mg 和高 Ti 榴辉岩中金红石的 Nb/Ta 比值与其 Nb 的含量呈弱负相关($R=-0.34 \sim -0.66$)(图 2h)。同一颗粒金红石 Nb、Ta 含量以及 Nb/Ta 比值比较均一,核边之间没有明显变化(图 3d、3f)。但是 Zr 含量具有系统的核、边差异,核部 Zr 含量高于边部(图 3c)。

利用 Zack *et al.* (2004)的金红石中 Zr 含量温度计(ZMK)计算的结果表明,除高 Mg 榴辉岩 SD019 外,其他榴辉岩样品中粒间金红石的温度范围为 $623 \sim 796$ °C(平均 645 °C),包裹体金红石的温度范围 $598 \sim 639$ °C(平均 614 °C)(表 3,图 4a)。高

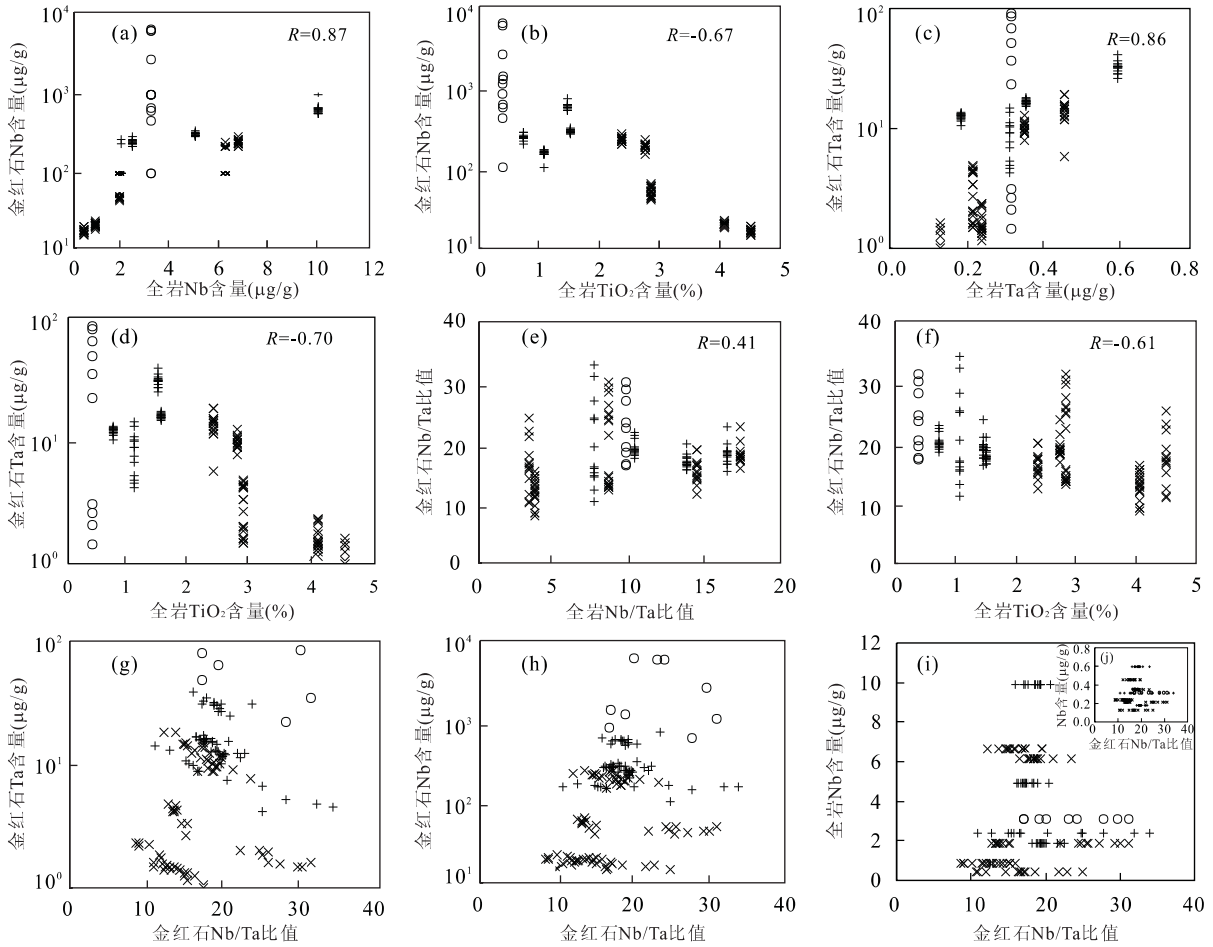


图 2 金红石 Nb、Ta 含量及 Nb/Ta 比值与全岩 Nb、Ta 和 TiO₂ 含量及 Nb/Ta 比值的 关系(图例同图 1)

Fig. 2 Plots of Nb and Ta contents and Nb/Ta ratios of rutiles versus Nb, Ta and TiO₂ contents and Nb/Ta ratios of parent eclogites 相关系数(R)由各样品平均值计算所获得. 图 2a 中相关系数计算未包括高 Mg 榴辉岩 SD0019(该样品金红石中 Nb 含量极高)

Mg 榴辉岩 SD019 中金红石计算的温度明显高于其他样品(达 827 °C; 表 3). 利用 Watson *et al.* (2006) 的金红石中 Zr 含量温度计(WWT)所得到的温度总体上较利用 Zack *et al.* (2004)金红石温度计的计算结果低(平均低 30~100 °C)(表 3). 但是利用 2 种 Zr 含量温度计获得的温度都表现出粒间金红石温度较包裹体金红石温度高的特征(表 3, 图 4a). 另外,粒间金红石核部温度明显高于边部温度(图 4b),且对于直径小于 300 μm 的金红石核部温度与金红石直径具有正相关关系(图 4c).

3 讨论

3.1 金红石 Nb/Ta 比值能否反映全岩特征?

Nb、Ta 具有相同的电价(+5)和相近的原子半径(Shannon, 1976),被认为在没有金红石存在条件

下的分离结晶过程中具有一致的地球化学行为. 实验研究表明金红石不仅会强烈富集 Nb 和 Ta ($D_{Nb,Ta} \gg 1$, 最高达 540), 且会使 Nb 和 Ta 显著分异 ($D_{Ta} > D_{Nb}$) (Green and Pearson, 1987; Brenan *et al.*, 1994; Stalder *et al.*, 1998; Foley *et al.*, 2000, 2002; Green, 2000; Horng and Hess, 2000; Schmidt *et al.*, 2004; Klemme *et al.*, 2005; Xiong *et al.*, 2005). 因此,金红石存在条件下的部分熔融或变质分异作用会显著影响所在体系的 Nb/Ta 比值. Nb 和 Ta 在金红石中的高度相容性特征,使全岩 Nb 和 Ta 绝大部分集中在金红石中(Foley *et al.*, 2000; Schmidt *et al.*, 2004; Klemme *et al.*, 2005; Xiong *et al.*, 2005). 因此, Rudnick *et al.* (2000)认为金红石的 Nb/Ta 比值可以代表榴辉岩全岩的 Nb/Ta 比值,并基于金红石 Nb/Ta 比值得出榴辉岩全岩 Nb/Ta 比值高于球粒陨石值. 笔者

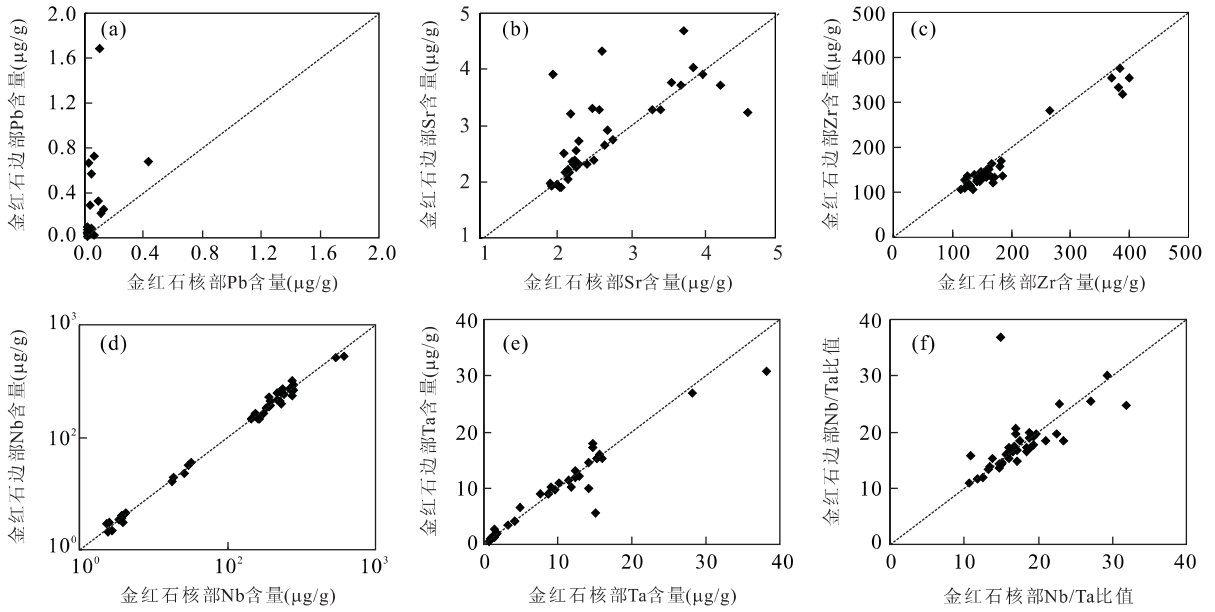


图 3 金红石中 Pb、Sr、Nb、Ta、Zr 含量及 Nb/Ta 比值的核—边变化

Fig. 3 Comparisons of Pb, Sr, Nb, Ta and Zr contents and Nb/Ta ratios between the cores and the rims of rutiles

表 3 金红石 Zr 含量地质温度计计算结果

Table 3 Temperatures calculated by the Zr in rutile thermometer

样品号	金红石产状	在 CCSD-MH 中的分布深度(m)	分析点数	温度(°C)					
				Zack <i>et al.</i> (2004)公式			Watson <i>et al.</i> (2006)公式		
				最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
SD001	包裹体 粒间体	109.77	1	615					
				607	674	645	567	603	587
SD004	包裹体 粒间体	189.63	15	604	665	639	565	597	583
				613	615	614	580	581	581
SD006	包裹体 粒间体	237.00	2	620	666	634	574	598	581
				13	622	679	654	575	605
SD009	包裹体 粒间体	317.70	1	611					
				17	622	679	654	575	605
SD014	包裹体 粒间体	419.10	2	619	633	626	583	591	587
				12	624	659	643	575	594
SD017	包裹体 粒间体	546.38	3	618	778	672	582	682	616
				16	613	820	655	570	691
SD018	包裹体 粒间体	568.10	1	728					
				12	751	783	771	647	667
SD019	包裹体 粒间体	610.00	3	812	827	818	706	717	710
				10	726	822	783	632	692
SD022	包裹体 粒间体	787.20	2	603	606	604	574	576	575
				11	624	656	638	576	586
SD033	包裹体 粒间体	1 065.70	3	613	623	617	579	585	582
				11	611	647	629	569	588

对 CCSD-MH 榴辉岩全岩以及其中金红石单矿物精确的微量元素含量分析发现,榴辉岩全岩 Nb/Ta 比值(17.61~3.36)整体较原始地幔值(17.5±2.0) (Sun and McDonough, 1989)低,而金红石 Nb/Ta

比值(平均 21.8)则主要表现为高于原始地幔值的特征,Nb/Ta 比值在榴辉岩全岩与金红石之间明显不一致(图 5)。

通过改变榴辉岩中石榴石、绿辉石和金红石的

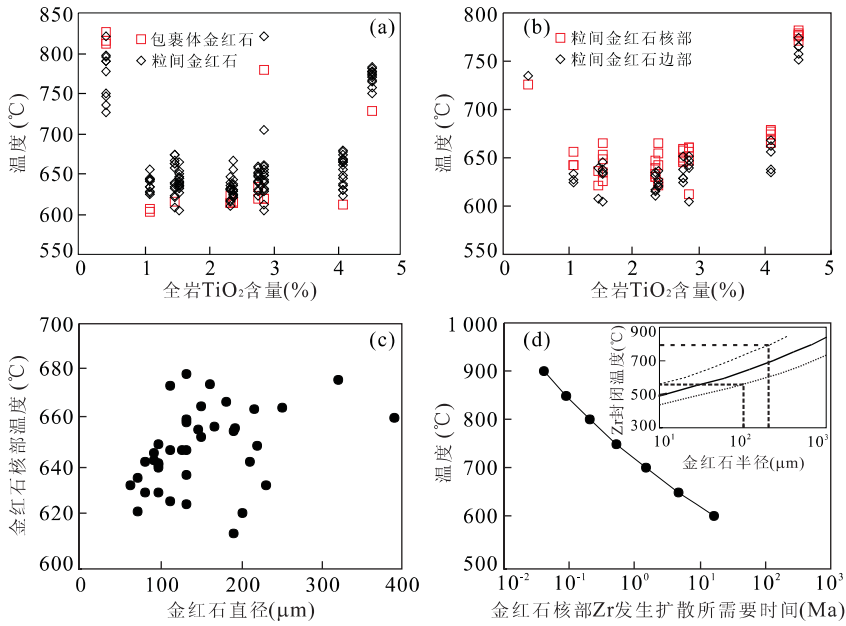


图 4 CCSD 榴辉岩中金红石温度变化特征

Fig. 4 Temperature variations of rutile in eclogites from CCSD

a、b. 不同产状金红石 Zr 含量温度计计算结果。包裹体金红石温度低于粒间金红石温度,而粒间金红石边部温度低于核部温度;c. 利用 Zack *et al.* (2004) 温度计获得的粒间金红石核部温度对颗粒直径的变化;d. 粒径 200 μm 的金红石在不同温度条件下其中心位置 Zr 发生扩散所需要的时间及金红石中 Zr 封闭温度和粒径的关系。温度计算是根据 Dodson(1973) 的封闭温度公式和 Cherniak *et al.* (2007) 金红石中 Zr 扩散系数进行的,分别计算了冷却速率为 $1\text{ }^\circ\text{C}\text{Ma}^{-1}$ (点线)、 $10\text{ }^\circ\text{C}\text{Ma}^{-1}$ (实线) 和 $100\text{ }^\circ\text{C}\text{Ma}^{-1}$ (虚线) 条件下的封闭温度

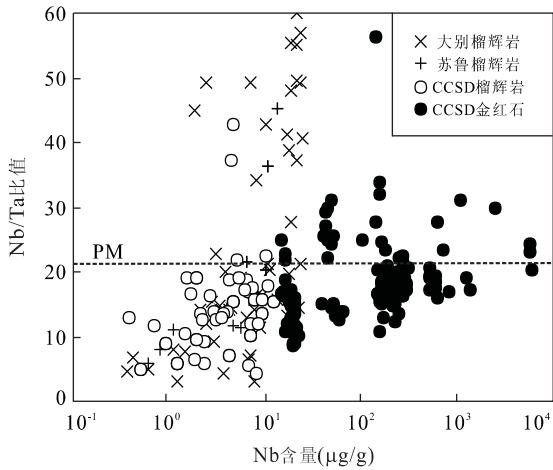


图 5 榴辉岩和金红石 Nb/Ta 比值与 Nb 的变化关系

Fig. 5 Nb/Ta ratios versus Nb contents for eclogites and rutiles

大别榴辉岩全岩据 Chavagnac and Jahn(1996)、Zhai and Cong(1996)、Liou *et al.* (1997)、Jahn(1998)、刘贻灿等(2000)、吴元保等(2000); 苏鲁榴辉岩全岩据 Jahn *et al.* (1996)、Jahn(1998)、Zhang *et al.* (2000)、孙景贵和胡受奚(2000)、王大志等(2006)。CCSD 榴辉岩数据包括本文及张泽明等(2003, 2004)、刘勇胜等(2005)、戚学祥等(2006)。原始地幔(PM)值据 Sun and McDonough(1989)

比例对全岩 TiO_2 、Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值进行平衡计算结果表明,榴辉岩全岩 Nb/Ta 比值受全岩 TiO_2 、Nb、Ta 含量及矿物组合共同控制(图 6a, 6c)。在全岩 TiO_2 含量很低的情况下($<0.5\%$),金红石含量极少,尽管其中 Nb、Ta 含量很高但对全岩贡献有限(图 6b, 6d)。因此,全岩 Nb/Ta 比值更多地受石榴石和绿辉石控制,而表现出低 Nb/Ta 比值的特征(图 6a)。而当全岩 TiO_2 的含量为 $0.5\% \sim 2.5\%$ 时,全岩 Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值虽然受到矿物组合的影响(图 6),但是主要受金红石含量控制,而表现出金红石 Nb/Ta 比值的特征(图 6a)。在全岩 TiO_2 含量 $> \sim 2.5\%$ 时,金红石对全岩 Nb、Ta 的含量起主导作用(图 6b, 6d), Nb/Ta 比值基本上完全受金红石 Nb/Ta 比值控制且相对稳定(图 6a, 6c)。在 TiO_2 含量高于 0.5% 而低于 $\sim 3\%$ 时,实测榴辉岩组成和模型计算结果吻合较好。但高 Ti 榴辉岩($\text{TiO}_2 > 3\%$)全岩 Nb/Ta 比值明显低于假设 TiO_2 全部以金红石形式存在时的模型计算结果(图 6a, 6c),表明高 Ti 榴辉岩中 Ti 主体不是以金红石形式存在的,这与该类样品中大量出现的钛赤铁矿、钛铁矿一致(徐珏等, 2004)。其极低的 Nb/Ta 比值应形

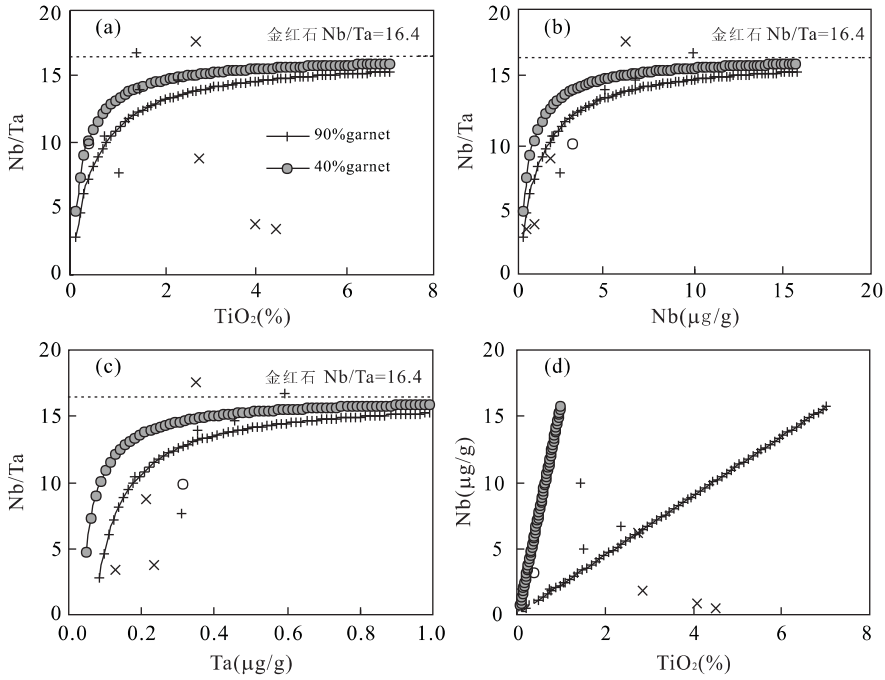


图 6 对榴辉岩 Nb/Ta 比值与 TiO_2 、Nb 和 Ta 含量关系的模拟计算(图例同图 1)

Fig. 6 Model calculations of Nb/Ta ratios versus TiO_2 , Nb and Ta contents for eclogites

计算中假设榴辉岩由石榴石+绿辉石+金红石组成,全岩 TiO_2 含量由石榴石+绿辉石中溶解的 TiO_2 和金红石中的 TiO_2 组成. 金红石中 TiO_2 含量取为 99%,并以 SD006 中金红石、石榴石和绿辉石 Nb、Ta 和 TiO_2 含量平均值代表金红石、石榴石和绿辉石中 Nb、Ta 和 TiO_2 含量

成于原岩的岩浆作用过程. 所以,尽管金红石是榴辉岩中 Nb、Ta 的主要载体矿物,但是并不能简单地用金红石 Nb/Ta 比值来代替全岩的 Nb/Ta 比值,低 TiO_2 ($<0.5\%$) 或异常高 Ti 榴辉岩中金红石 Nb/Ta 比值不能直接反映全岩 Nb/Ta 比值特征(图 6a, 6c). 因此,在利用金红石 Nb/Ta 比值代替全岩比值时不仅要考虑全岩 TiO_2 含量,更重要的是考虑有多少全岩 TiO_2 是由金红石贡献的.

3.2 榴辉岩 Nb/Ta 比值的控制因素及其成因意义

大别—苏鲁不同类型榴辉岩全岩 Nb/Ta 比值变化范围很大(1.6~64),但是总体表现出低于原始地幔值(17.5 ± 2.0) (Sun and McDonough, 1989) 的特征(图 5),不支持与俯冲有关的榴辉岩可能是高 Nb/Ta 比值的隐藏储库的观点(Rudnick *et al.*, 2000). 这与 Kamber *et al.* (2002) 对 Franciscan Complex, Baja, Samana Peninsula 以及 Alps 等地榴辉岩 Nb/Ta 比值的统计结果(平均值 33.7) 不同. CCSD-MH 榴辉岩明显偏低的 Nb/Ta 比值可能是其原岩特征的反映. Liu *et al.* (2008) 对 CCSD-MH 榴辉岩的研究认为高 Mg 榴辉岩原岩是在玄武质岩浆房中形成的橄榄辉石岩堆晶产物,高 Ti 榴辉岩原

岩则是由铁质玄武岩浆中堆晶形成的富钛磁铁矿辉长岩,低 Mg-Ti 榴辉岩原岩则可能是由高 Mg 和高 Ti 榴辉岩原岩高度分离结晶后的演化熔体. 矿物与玄武质熔体之间 Nb、Ta 分配系数实验研究表明 Nb、Ta 在橄榄石 ($D_{\text{Nb}}/D_{\text{Ta}} = 0.0016 \sim 0.0065/0.065 \sim 0.17$; Dunn and Sen, 1994)、单斜辉石 ($D_{\text{Nb}}/D_{\text{Ta}} = 0.0081/0.0102$; Hauri *et al.*, 1994)、石榴石 ($D_{\text{Nb}}/D_{\text{Ta}} = 0.015 \sim 0.04/0.051 \sim 0.15$; Green *et al.*, 1989; Jenner *et al.*, 1993)、斜长石 ($D_{\text{Nb}}/D_{\text{Ta}} = 0.008 \sim 0.045/0.027 \sim 0.11$; Dunn and Sen, 1994) 和磁铁矿 ($D_{\text{Nb}}/D_{\text{Ta}} = 0.01 \sim 1.8/0.01 \sim 2.53$; Nielsen *et al.*, 1994; Nielsen and Beard, 2000) 中均是不相容元素,且 Nb 比 Ta 更不相容,即 $D_{\text{Nb}} < D_{\text{Ta}} < 1$. 在玄武质岩浆演化早期的橄榄石/辉石分离结晶作用中, Ti、Nb、Ta 的分配主要发生在橄榄石+辉石与熔体之间,因此高 Mg 榴辉岩原岩不仅具有低 Ti、Nb、Ta 含量,同时其 Nb/Ta 比值也低于原始熔体(图 1). 伴随着玄武质岩浆演化,熔体中 FeO 和 TiO_2 含量增加,导致钛磁铁矿分离结晶从而形成具有非耦合的高 Ti、低 Nb(Ta) 特征的富钛磁铁矿辉长质堆晶产物(刘勇胜等, 2005; Liu *et*

al., 2008). 但是 Nb、Ta 在磁铁矿中同样具有 $D_{Nb} < D_{Ta} < 1$ 的特征 (Nielsen *et al.*, 1994; Nielsen and Beard, 2000). 因此, 高 Ti 榴辉岩原岩 (富钛磁铁矿辉长质堆晶岩) 具有比原始玄武质熔体更低的 Nb/Ta 比值和 Nb、Ta 含量 (图 1). 橄榄石、单斜辉石、斜长石和磁铁矿的分离结晶作用导致残余熔体中 Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值随分离结晶作用程度的增加而增加. 因此经历过橄榄石、单斜辉石、斜长石和磁铁矿分离结晶的演化熔体固结或高度分离结晶形成的低 Mg-Ti 榴辉岩的原岩 Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值将会明显高于高 Mg 和高 Ti 榴辉岩原岩 (图 1). CCSD-MH 中榴辉岩所特有的非耦合的高 Ti、低 Nb(Ta) 特征 (图 1a, 1c), 以及 Nb/Ta 比值与 Nb、Ta 含量正相关 (图 1b, 1d) 而与 TiO_2 含量负相关的特征 (图 1f) 均表明全岩高度变化的 Nb/Ta 比值特征是其原岩特征的反映, 记录了原岩形成过程中的岩浆分离结晶作用.

金红石 Nb、Ta 含量与榴辉岩全岩 Nb、Ta 含量正相关 (图 2a, 2c), 与全岩 TiO_2 含量负相关 (图 2b, 2d), 而且 Nb/Ta 比值明显高于全岩 (图 5), 且与全岩 Nb/Ta 比值无明显相关性 (图 2e), 表明金红石应形成于超高压变质作用, 而不是继承自原岩的结晶作用. 继承自原岩和熔体平衡的金红石其 Nb/Ta 比值及 Nb、Ta 含量应主要受分离结晶程度和结晶产物组成控制. 因为 Nb 和 Ta 在金红石中高度相容 ($D_{Nb, Ta} \gg 1$, 最高达 540), 且 Ta 比 Nb 更相容 ($D_{Ta} > D_{Nb}$) (Green and Pearson, 1987; Brenan *et*

al., 1994; Stalder *et al.*, 1998; Foley *et al.*, 2000, 2002; Green, 2000; Horng and Hess, 2000; Schmidt *et al.*, 2004; Klemme *et al.*, 2005; Xiong *et al.*, 2005), 分离结晶形成的金红石 Nb/Ta 比值与全岩 Nb、Ta 含量应具有明显的负相关性 (图 7a), 且金红石 Nb/Ta 比值与全岩 Nb/Ta 比值基本一致 (图 7b). 因此, CCSD-MH 榴辉岩中的金红石应是在超高压或退变质作用过程中相变形成的.

对于高 Ti 榴辉岩, 原岩变质作用前 Ti 主要赋存于钛磁铁矿中, 而 Nb 和 Ta 则在钛磁铁矿、单斜辉石、斜长石中都有分布. 以钛磁铁矿形式出现的 Ti 相对 Nb(Ta) 过剩. 超高压变质作用导致钛磁铁矿分解形成“大量”金红石, “少量”的 Nb 和 Ta 从钛磁铁矿、单斜辉石、斜长石中析出而在“大量”金红石中重新分配, 因此金红石 Nb、Ta 含量与全岩 TiO_2 含量负相关 (图 2b, 2d). 高 Mg 榴辉岩原岩 Ti、Nb、Ta 均赋存在橄榄石、单斜辉石、斜长石中, 超高压变质形成金红石的数量则取决于在特定温度—压力条件下 Ti 在石榴石、绿辉石中的溶解度 (溶解度越大, 形成的金红石数量则越少), 而 Nb、Ta 由于其在金红石中的高度相容性则会从石榴石、绿辉石中析出而进入少量的金红石中, 因此高 Mg 榴辉岩中金红石高度富集 Nb、Ta (图 2a, 2d). 低 Mg-Ti 榴辉岩原岩是由高 Mg 和高 Ti 榴辉岩原岩分馏结晶后的残余熔体形成, 其中 Ti、Nb、Ta 等的分配整体符合稀溶液定律. 因此, 尽管其原岩在超高压变质作用中形成金红石的数量同样与 Ti 在石榴石、绿辉石中的溶

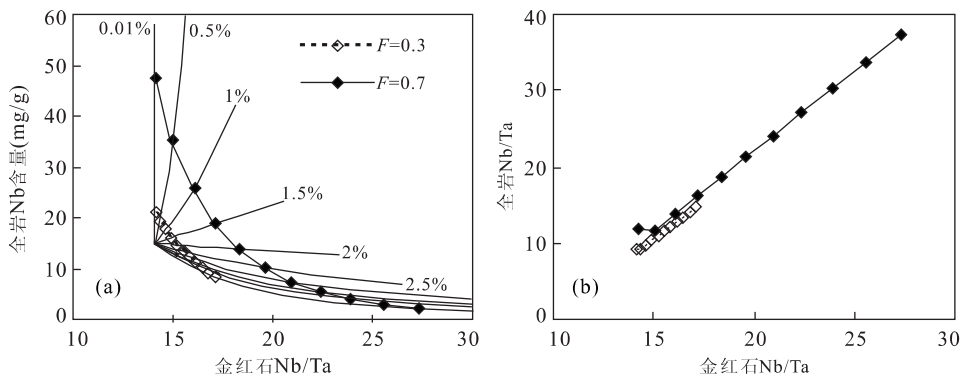


图 7 含金红石辉长岩分离结晶作用过程中 Nb/Ta 比值的变化

Fig. 7 Nb/Ta variations during fractionation crystallization of rutile-bearing gabbro

计算中以大陆溢流玄武岩平均值 (Nb=15.1 ppm, Ta=1.07 ppm) 作为原始熔体, 假设结晶辉长岩的矿物组成为 60%~55%斜长石 + 25%单斜辉石 + 10%斜方辉石 + 4.5%橄榄石 + 0%~5%金红石. 根据 Nb、Ta 在斜长石 (Dunn and Sen, 1994)、单斜辉石 (Hauri *et al.*, 1994)、斜方辉石 (Dunn and Sen, 1994)、橄榄石 (Ulmer, 1989) 以及金红石 (Jenner *et al.*, 1993) 与熔体之间的分配系数, 分别计算了分离结晶程度为 30% 和 70% 时全岩和金红石的 Nb、Ta 含量和 Nb/Ta 比值. 图中虚线代表不同金红石含量 (增量为 0.5%)

解度有关,但由于 Ti 含量较高,溶解于石榴石、绿辉石中的 Ti 远远低于全岩 TiO_2 总含量. 因此低 Mg-Ti 榴辉岩形成金红石时, Nb、Ta 既不会相对 Ti 过饱和(如高 Mg 榴辉岩)也不会相对 Ti 严重不足(如高 Ti 榴辉岩),而与全岩的特征保持一致(图 2a、2d). 因而,低 Mg-Ti 榴辉岩实测全岩 Nb/Ta 比值与理论计算值相对一致,而不同于高 Mg 和高 Ti 榴辉岩(图 6a、6c).

3.3 金红石中 Zr 含量温度计与 Zr 的扩散作用

金红石—锆石—石英体系中金红石 Zr 含量地质温度计近年来得到了较多应用(Zack *et al.*, 2004; 王汝成等, 2005; Spear *et al.*, 2006; Watson *et al.*, 2006). 相对于榴辉岩峰期变质温度(700~860 °C)(Wang *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 1994, 1995; Zhang *et al.*, 1996; Banno *et al.*, 2000; Yao *et al.*, 2000), 前人利用金红石中 Zr 含量地质温度计(Zack *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2006)获得的大别—苏鲁榴辉岩中金红石的形成温度为 608~787 °C(王汝成等, 2005; 陈振宇等, 2006a, 2006b; 高天山等, 2006), 明显低于通过其他温度计获得的超高压峰期变质温度. 笔者对 CCSD-MH 金红石形成温度的计算结果表明, 除高 Mg 榴辉岩相对较高以外(最高 827 °C), 其他类型榴辉岩的变化范围在 598 °C 至 787 °C 之间, 同样呈现偏低特征(图 4). 金红石 Zr 含量计算的温度能否记录其形成温度, 要视其形成后 Zr 的封闭情况(影响因素包括温度、流体、扩散速率等)而定(Zack *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2006). 利用 Zr 含量地质温度计获得的温度偏低的可能原因包括: (1) 榴辉岩原岩中 Zr-Ti“不平衡”, 即 Zr 相对 Ti 不足; (2) 金红石不是在超高压变质峰期形成; (3) 金红石形成后受后期作用影响导致 Zr 含量降低, 从而使得计算温度偏低.

CCSD-MH 榴辉岩全岩呈现明显的非耦合高 TiO_2 、低 Zr 特征(图 8), 对于 TiO_2 含量异常高(>~2.5%)的榴辉岩, 在超高压变质作用形成大量金红石的过程中可能存在 Zr-Ti“不平衡”, 即 Zr 含量相对其他类型榴辉岩可能是不饱和的(至少是局部不饱和). Zack *et al.* (2004) 的经验公式以及 Watson *et al.* (2006) 给出的实验公式均未考虑这一现象. 因此, 这可能是利用高 Ti 榴辉岩中金红石计算的温度偏低的原因之一. 而高 Mg 榴辉岩在超高压变质作用中形成的金红石含量极少, Zr 含量相对

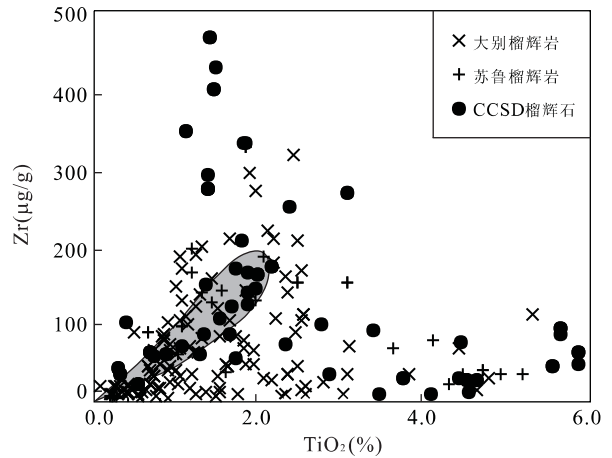


图 8 榴辉岩及大洋中脊玄武岩中 Zr 对 TiO_2 变化关系
Fig. 8 Plot of Zr versus TiO_2 for eclogites and the middle ocean ridge basalts (MORB)

大别和苏鲁榴辉岩数据来源同图 5. 阴影区域为大洋中脊玄武岩 (MORB), 据 <http://petdb.columbia.petdb/>

饱和, 以致有足够的 Zr 进入金红石. 因此, 高 Mg 榴辉岩中的金红石记录的较高的温度可能更接近榴辉岩相变质温度.

另外, 如果金红石并非形成于峰期变质阶段, 而是形成于进变质阶段或者折返过程中的退变质冷却阶段, 同时金红石中 Zr 又能够在形成后及时封闭, 那么金红石 Zr 含量所记录的温度同样会低于榴辉岩峰期变质温度. CCSD-MH 榴辉岩中金红石多数以粒间金红石的形式存在, 包裹体金红石数量相对较少(王硕等, 2006). 整体而言, 包裹体金红石所记录的温度(平均 614 °C) 低于粒间金红石(平均 640 °C)(图 4a). 包裹体金红石由于受寄主矿物的保护, 很少遭受后期改造作用(Zack *et al.*, 2004), 记录的温度应该是其形成温度的真实反映, 但其记录的温度与大别—苏鲁榴辉岩经历绿帘角闪岩相进变质阶段的温度一致(500~600 °C; 张泽明等, 2005), 暗示包裹体金红石可能主要形成于进变质作用阶段, 记录了进变质阶段的温度变化.

尽管粒间金红石记录的温度高于包裹体金红石(图 4a), 但仍低于榴辉岩的峰期变质温度(700~860 °C; Wang *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 1994, 1995; Zhang *et al.*, 1996; Banno *et al.*, 2000; Yao *et al.*, 2000). 这暗示金红石形成后其中的 Zr 并没有封闭, 或者受到了后期作用的改造. 粒间金红石边部温度普遍低于核部温度(图 4b), 且核部温度与其粒径呈正相关关系(图 4c). 这种核—边温度变

化及其与粒径的关系充分反映了后期 Zr 扩散作用的影响。另一方面,这些金红石边部明显的高 Pb、Sr 特征(图 3a、3b)与退变质过程中流体活动的特征一致(张斌辉等, 2006)。利用 Dodson(1973)元素封闭温度公式以及 Cherniak *et al.* (2007)给出的金红石 Zr 扩散系数的计算结果表明:对于半径 100~200 μm 的金红石,在冷却速率为 1~100 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 的条件下 Zr 的封闭温度范围为 560~800 $^{\circ}\text{C}$ (图 4d)。因此,金红石中 Zr “较容易”受到扩散作用改造。在 900 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,半径为 100 μm 的金红石其中心位置 Zr 发生扩散所需要的时间仅为 0.04 Ma(图 4d),即便是在 600 $^{\circ}\text{C}$ 条件下其中心位置 Zr 发生扩散所需要的时间也仅 16.6 Ma(图 4d),该时间接近或低于榴辉岩变质作用所持续的时间(10~20 Ma)(Zheng *et al.*, 2003; 张泽明等, 2005; Liu *et al.*, 2006b; 刘福来等, 2006a; 刘贻灿等, 2006; Wu *et al.*, 2006)。如果存在流体活动,金红石中 Zr 发生扩散所需要的时间将更短(Watson *et al.*, 2006)。因此,扩散作用和/或后期流体作用的影响可能是导致苏鲁—大别榴辉岩金红石 Zr 含量温度计计算结果偏低的重要原因。

4 结论

对 CCSD-MH 100~1 100 m 榴辉岩全岩主、微量元素以及金红石的 LA-ICP-MS 分析研究表明,榴辉岩全岩低 Nb/Ta 比值的特征反映了其原岩形成过程中与玄武质岩浆平衡分配的结果。金红石高 Nb/Ta 比值的特征则是 Nb、Ta 在超高压变质作用过程中在不同矿物之间重新分配形成。Nb/Ta 比值在全岩和金红石之间的非耦合关系表明尽管金红石是榴辉岩中 Nb、Ta 的主要寄主矿物,但并不一定能够完全表征榴辉岩全岩特征,而与榴辉岩原岩中 Ti 的赋存形式及含量有关。

本研究表明金红石 Zr 含量地质温度计在实际应用中可能存在一定的局限性,对于异常高 Ti 榴辉岩可能是不合适的。粒间金红石中与流体活动密切相关的元素 Pb、Sr 所具有的边部富集特征以及金红石核部温度与粒径之间的正相关性充分反映粒间金红石形成后其中的 Zr 并没有封闭,这应是导致大别—苏鲁榴辉岩中金红石 Zr 含量所记录温度偏低的重要原因,为金红石中 Zr 含量受到扩散作用和/或后期流体活动的影响提供了证据。

致谢:感谢刘慧芳老师在 EMP 分析中所给予的帮助和指导。

References

- Audetat, A., Keppler, H., 2005. Solubility of rutile in subduction zone fluids, as determined by experiments in the hydrothermal diamond anvil cell. *Earth and Planetary Science Letters*, 232(3-4):393-402.
- Ayers, J. C., Dunkle, S., Gao, S., et al., 2002. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in the Dabie Shan ultrahigh-pressure metamorphic belt, east-central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. *Chemical Geology*, 186(3-4):315-331.
- Banno, S., Enami, M., Hirajima, T., et al., 2000. Decompression P-T path of coesite eclogite to granulite from Weihai, eastern China. *Lithos*, 52(1-4):97-108.
- Brenan, J. M., Shaw, H. F., Phinney, D. L., et al., 1994. Rutile-aqueous fluid partitioning of Nb, Ta, Hf, Zr, U and Th: Implications for high field strength element depletions in island-arc basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 128(3-4):327-339.
- Brophy, J. G., Marsh, B. D., 1986. On the origin of high-alumina arc basalt and the mechanics of melt extraction. *J. Petrol.*, 27:763-789.
- Chavagnac, V., Jahn, B. M., 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China; Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chemical Geology*, 133(1-4):29-51.
- Chen, J., Xu, Z. Q., Li, X. P., 2005. The formation of nanometer twins of rutile and its textural characteristics in UHP eclogite. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2):399-404 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. Y., Wang, D. H., Chen, Y. C., et al., 2006a. Mineral geochemistry of rutile in eclogite and its implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4):533-538, 550 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. Y., Yu, J. J., Xu, J., et al., 2006b. EMP trace elements analysis of rutile in eclogite. *J. Chin. Electr. Microsc. Soc.*, 25(Suppl.):295-296 (in Chinese).
- Cherniak, D. J., Manchester, J., Watson, E. B., 2007. Zr and Hf diffusion in rutile. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(1-2):267-279.
- Dodson, M. H., 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 40:259-274.
- Dunn, T., Sen, C., 1994. Mineral/matrix partition coefficients for orthopyroxene, plagioclase, and olivine in ba-

- saltic to andesitic systems: A combined analytical and experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(2):717–733.
- Foley, S. F., Barth, M. G., Jenner, G. A., 2000. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(5):933–938.
- Foley, S. F., Massimo, T., Riccardo, V., 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 417:837–840.
- Gao, T. S., Zheng, Y. F., Chen, R. X., 2006. Applications of the different types of mineral-pair geothermometers to eclogite at Huangzhen in the Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7):1957–1968 (in Chinese with English abstract).
- Green, T. H., 2000. New partition coefficient determinations pertinent to hydrous melting processes in subduction zones. State of the Arc 2000: Processes and timescales. Wellington, 92–95.
- Green, T. H., Pearson, N. J., 1987. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(1):55–62.
- Green, T. H., Sie, S. H., Ryan, C. G., et al., 1989. Proton microprobe-determined partitioning of Nb, Ta, Zr, Sr and Y between garnet, clinopyroxene and basaltic magma at high pressure and temperature. *Chemical Geology*, 74(3–4):201–216.
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161:215–230.
- Hauri, E. H., Wagner, T. P., Grove, T. L., 1994. Experimental and natural partitioning of Th, U, Pb and other trace elements between garnet, clinopyroxene and basaltic melts. *Chemical Geology*, 117:149–166.
- Horng, W. S., Hess, P. C., 2000. Partition coefficients of Nb and Ta between rutile and anhydrous haplogranite melts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 138:176–185.
- Jahn, B. M., 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen; Implications for continental subduction and collisional tectonics. In: Hacker, B. R., Liou, J. G., eds., When continents collide; Geodynamics and geochemistry of ultrahigh-pressure rocks. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 203–239.
- Jahn, B. M., Cornichet, J., Cong, B. L., et al., 1996. Ultrahigh- P eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. *Chemical Geology*, 127(1–3):61–79.
- Jenner, G. A., Foley, S. F., Jackson, S. E., et al., 1993. Determination of partition coefficients for trace elements in high pressure-temperature experimental run products by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(23–24):5099–5103.
- Kamber, B. S., Ewart, A., Collerson, K. D., et al., 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144:38–56.
- Klemme, S., Prowatke, S., Hametner, K., et al., 2005. Partitioning of trace elements between rutile and silicate melts; Implications for subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(9):2361–2371.
- Li, Q., Li, S. Q., Zheng, Y. F., et al., 2003. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in Central China: A new constraint on the cooling history. *Chemical Geology*, 200(3–4):255–265.
- Li, S. Q., Jagoutz, E., Chen, Y. I., et al., 2000. 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(6):1077–1093.
- Li, X. F., Chen, Z. Y., Wang, R. C., et al., 2005. Mineralogical and geochemical features of hair-like rutile in rocked quartz in Donghai, Jiangsu Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2):475–481 (in Chinese with English abstract).
- Liou, J. G., Zhang, R. Y., Jahn, B. M., 1997. Petrology, geochemistry and isotope data on an ultrahigh-pressure jadeite quartzite from Shuanghe, Dabie Mountains, east-central China. *Lithos*, 41(1–3):59–78.
- Liu, D. Y., Jian, P., Kröner, A., et al., 2006. Dating of prograde metamorphic events deciphered from episodic zircon growth in rocks of the Dabie-Sulu UHP complex, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(3–4):650–666.
- Liu, F. L., Xue, H. M., Xu, Z. Q., et al., 2006a. SHRIMP U-Pb zircon dating from eclogite lens in marble, Shuanghe area, Dabie UHP terrane; Restriction on the prograde, UHP and retrograde metamorphic ages. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7):1761–1778 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Gerdes, A., Liou, J. G., et al., 2006b. SHRIMP U/Pb zircon dating from Sulu-Dabie dolomitic marble, eastern China; Constraints on prograde, ultrahigh pressure and retrograde metamorphic ages. *J. Metamorph.*

- Geol.*, 24(7):569—589.
- Liu, F. L., Gerdes, A., Zeng, L. S., et al., 2008. SHRIMP U-Pb dating, trace elements and the Lu-Hf isotope system of coesite-bearing zircon from amphibolite in the SW Sulu UHP terrane, eastern China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, doi: 10.1016/j.gca.2008.04.007.
- Liu, Y. C., Li, S. G., Xu, S. T., et al., 2006. Ultrahigh-pressure metamorphic evidence for gneiss from the northern Dabie complex, Central China: Message from zircon. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7):1827—1832 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. C., Xu, S. T., Li, S. G., et al., 2000. Eclogites from the northern Dabie Mountains, eastern China: Geochemical characteristics, Sr-Nd isotopic compositions and tectonic implications. *Science in China (Series D)*, 43:178—188.
- Liu, Y. S., Iong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese Continental Scientific Drill. *Chem. Geol.*, 247:133—153.
- Liu, Y. S., Zhang, Z. M., Lee, C. T., et al., 2005. Decoupled high-Ti from low-Nb (Zr) of eclogites from the CCSD: Implications for magnetite fractional crystallization in basalt chamber. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2):339—346 (in Chinese with English abstract).
- Miller, C., Zanetti, A., Thoni, M., et al., 2007. Eclogitisation of gabbroic rocks; Redistribution of trace elements and Zr in rutile thermometry in an Eo-Alpine subduction zone (eastern Alps). *Chemical Geology*, 239(1—2):96—123.
- Morris, J. D., Leeman, W. P., Tera, F., 1990. The subducted component in island arc lavas; Constraints from Be isotopes and B-Be systematics. *Nature*, 344:31—36.
- Nielsen, R. L., Beard, J. S., 2000. Magnetite-melt HFSE partitioning. *Chemical Geology*, 164(1—2):21—34.
- Nielsen, R. L., Forsythe, L. M., Gallahan, W. E., et al., 1994. Major and trace-element magnetite-melt equilibria. *Chemical Geology*, 117(1—4):167—191.
- Qi, X. X., Tang, Z. M., Yan, L., 2006. Geochemical characteristics of garnet-amphibolite from the pre-pilot hole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD-PP2) and its geological significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4):539—550 (in Chinese with English abstract).
- Ringwood, A. E., 1990. Slab-mantle interactions 3. Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle. *Chem. Geol.*, 82:187—207.
- Rudnick, R. L., Barth, M., Horn, I., et al., 2000. Rutile-bearing refractory eclogites; Missing link between continents and depleted mantle. *Science*, 287:278—281.
- Rudnick, R. L., Gao, S., Ling, W. L., et al., 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 77(1—4):609—637.
- Schmidt, M. W., Dardon, A., Chazot, G., et al., 2004. The dependence of Nb and Ta rutile-melt partitioning on melt composition and Nb/Ta fractionation during subduction processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 226(3—4):415—432.
- Shannon, R. D., 1976. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in chalcides and halogenides. *Acta Crystallographica Section A*, 32(5):751—767.
- Spear, F. S., Wark, D. A., Cheney, J. T., et al., 2006. Zr-in-rutile thermometry in blueschists from Sifnos, Greece. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152:375—385.
- Stalder, R., Foley, S. F., Brey, G. P., et al., 1998. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900—1200 °C and 3.0—5.7 GPa; New experimental data for garnet, clinopyroxene, and rutile, and implications for mantle metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(10):1781—1801.
- Sun, J. G., Hu, S. X., 2000. Research on geochemical variation during the retrograde metamorphic processes of eclogite—From the eclogite bodies in the Rongcheng-Weihai rock belt of Sulu (Jiangsu-Shandong) UHMB. *J. Mineral. Petrol.*, 20(1):17—23 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society Special Publications, London, 313—345.
- Tatsumi, Y., Nakamura, N., 1986. Composition of aqueous fluid from serpentinite in the subducted lithosphere. *Geochem. J.*, 20:191—196.
- Ulmer, P., 1989. Partitioning of high field strength elements among olivine, pyroxenes, garnet and calc alkaline picrobasalt; Experimental results and an application. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics*, 42—47.
- Ulmer, P., Trommsdorff, V., 1995. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism. *Science*, 268:858—861.
- Wan, Y., Li, R. W., Wilde, S. A., et al., 2005. UHP metamorphism and exhumation of the Dabie orogen, China: Evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei basin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69(17):4333—4348.

- Wang, D. Z., Zhang, Z. M., Shen, K., et al., 2006. Origin of Ti-rich eclogite and rutile deposit in the Donghai area of the southern Sulu UHP metamorphic belt, China. *Geological Bulletin of China*, 25(7): 839–849 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. C., Ishiwatari, A., Zhao, Z. Y., et al., 1993. Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *Eur. J. Mineral.*, 5(1): 141–152.
- Wang, R. C., Wang, S., Qiu, J. S., et al., 2005. Rutile in the UHP eclogites from the CCSD main drillhole (Donghai, eastern China): Trace-element geochemistry and metallogenetic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 465–474 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Wang, R. C., Qiu, J. S., et al., 2006. Mineral inclusions in rutile of Sulu UHP eclogites from the main drill hole of CCSD, Donghai. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 61–70 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E. B., Wark, D. A., Thomas, J. B., 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 151(4): 413–433.
- Wu, Y. B., Chen, D. G., Cheng, H., et al., 2000. Geochemical characteristics of retrometamorphic eclogite in Raobazai, northern Dabie Mountains. *Seismology and Geology*, 22 (Suppl.): 99–103 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2006. U-Pb, Hf and O isotope evidence for two episodes of fluid-assisted zircon growth in marble-hosted eclogites from the Dabie orogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(14): 3743–3761.
- Xiao, Y. L., Sun, W. D., Hoefs, J., et al., 2006. Making continental crust through slab melting: Constraints from niobium-tantalum fractionation in UHP metamorphic rutile. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): 4770–4782.
- Xiong, X. L., Adam, J., Green, T. H., 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218(3–4): 339–359.
- Xu, J., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100–2 000 m main hole. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 119–126 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., 2004. The scientific goals and investigation progress of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y., Ye, K., Liu, J., et al., 2000. A transitional eclogite to high pressure granulite-facies overprint on coesite-eclogite at Taohang in the Sulu ultrahigh-pressure terrane, eastern China. *Lithos*, 52(1–4): 109–120.
- Yu, J. J., Xu, J., Chen, Z. Y., et al., 2006. Trace element geochemistry of rutiles in the eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling Project Main Hole. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1835–1841 (in Chinese with English abstract).
- Zack, T., Kronz, A., Foley, S. F., et al., 2002. Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chemical Geology*, 184: 97–122.
- Zack, T., Moraes, R., Kronz, A., 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: Empirical calibration of a rutile thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 471–488.
- Zhai, M. G., Cong, B. L., 1996. Major and trace element geochemistry of eclogites and related rocks. In: Cong, B. L., ed., Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu region of China. Science Press and Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 69–89.
- Zhang, B. H., Liu, Y. S., Zong, K. Q., et al., 2006. Geochemical behavior of trace elements during retrograde metamorphism of eclogites; Study on the retrograde eclogites from the CCSD main hole. *Acta Petrologica Sinica*, 22(T): 1833–1844 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Hirajima, T., Banno, S., et al., 1995. Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Su-Lu region, eastern China. *J. Metamorph. Geol.*, 13: 659–675.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Cong, B. L., 1994. Petrogenesis of garnet-bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Su-Lu ultrahigh-P metamorphic terrane, eastern China. *J. Metamorph. Geol.*, 12: 169–186.
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2003. Petrology and petrochemistry of UHP metamorphic rocks from the Sulu orogenic belt, eastern central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 478–491 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100–2 050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27–42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Xu, H. F., 2000. Petrology of ultrahigh-pressure eclogites from the ZK703 drill hole in the Donghai, eastern China. *Lithos*, 52(1–4): 35–50.
- Zhang, Z. M., You, Z. D., Han, Y. J., et al., 1996. Petrology, metamorphic process and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt, eastern-central China. *Acta Geologica Sinica*, 9: 134–156.

- Zhang, Z. M., Zhang, J. F., You, Z. D., et al., 2005. Ultrahigh-pressure metamorphic P-T-t path of the Sulu orogenic belt, eastern central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 257—270 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R., Zhang, R. Y., Liou, J. G., et al., 2007. Petrochemistry, oxygen isotopes and U-Pb SHRIMP geochronology of mafic-ultramafic bodies from the Sulu UHP terrane, China. *J. Metamorph. Geol.*, 25(2): 207—224.
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Gao, T. S., et al., 2006. Isotopic constraints on age and duration of fluid-assisted high-pressure eclogite-facies recrystallization during exhumation of deeply subducted continental crust in the Sulu orogen. *J. Metamorph. Geol.*, 24: 687—702.
- Zheng, Y. F., 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(1—2): 105—161.
- ### 附中文参考文献
- 陈晶, 许志琴, 李旭平, 2005. 超高压榴辉岩中金红石的纳米级微构造特征及成因机制探讨. *岩石学报*, 21(2): 399—404.
- 陈振宇, 王登红, 陈毓川, 等, 2006a. 榴辉岩中金红石的矿物地球化学研究及其意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(4): 533—538, 550.
- 陈振宇, 余金杰, 徐珏, 等, 2006b. 榴辉岩中金红石的微量元素电子探针分析. *电子显微学报*, 25(增刊): 295—296.
- 高天山, 郑永飞, 陈仁旭, 2006. 大别造山带黄镇榴辉岩矿物不同类型地质温度计应用和对比. *岩石学报*, 22(7): 1957—1968.
- 李晓峰, 陈振宇, 王汝成, 等, 2005. 江苏东海毛发状水晶中金红石矿物学、地球化学特征. *岩石学报*, 21(2): 475—481.
- 刘福来, 薛怀民, 许志琴, 等, 2006a. 大别超高压变质带的进变质、超高压和退变质时代的准确限定: 以双河大理岩中榴辉岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年为例. *岩石学报*, 22(7): 1761—1778.
- 刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 等, 2006. 北大别片麻岩的超高压变质证据——来自锆石提供的信息. *岩石学报*, 22(7): 1827—1832.
- 刘贻灿, 徐树桐, 李曙光, 等, 2000. 大别山北部榴辉岩的地球化学特征和 Sr, Nd 同位素组成及其大地构造意义. *中国科学(D辑)*, 30(增刊): 99—107.
- 刘勇胜, 张泽明, Lee, C. T., 等, 2005. CCSD 主孔高 Ti 榴辉岩非耦合的高 Ti、低 Nb(Zr) 特征: 对玄武质岩浆房中磁铁矿分离结晶作用的指示. *岩石学报*, 21(2): 339—346.
- 戚学祥, 唐哲民, 闫玲, 2006. 中国大陆科学钻探预先导孔 (CCSD-PP2) 榴辉岩的地球化学组成及其地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(4): 539—550.
- 孙景贵, 胡受奚, 2000. 榴辉岩退变质过程的地球化学研究——以荣成一威海岩段的榴辉岩体为例. *矿物岩石*, 20(1): 17—23.
- 王大志, 张泽明, 沈昆, 等, 2006. 南苏鲁超高压变质带东海地区富钛榴辉岩及金红石矿的成因. *地质通报*, 25(7): 839—849.
- 王汝成, 王硕, 邱检生, 等, 2005. CCSD 主孔揭示的东海超高压榴辉岩中金红石: 微量元素地球化学及其成矿意义. *岩石学报*, 21(2): 465—474.
- 王硕, 王汝成, 邱检生, 等, 2006. CCSD 主孔超高压榴辉岩金红石中的矿物包裹体研究. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 61—70.
- 吴元保, 陈道公, 程昊, 等, 2000. 北大别饶拔寨退变质榴辉岩的地球化学特征. *地震地质*, 22(增刊): 99—103.
- 徐珏, 陈毓川, 王登红, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 超高压变质岩中的钛矿化. *岩石学报*, 20(1): 119—126.
- 许志琴, 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. *岩石学报*, 20(1): 1—8.
- 余金杰, 徐珏, 陈振宇, 等, 2006. 中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩中金红石微量元素地球化学特征. *地质学报*, 80(12): 1835—1841.
- 张斌辉, 刘勇胜, 宗克清, 等, 2006. 榴辉岩退变质过程中的微量元素地球化学行为: 对 CCSD 主孔退变质榴辉岩的研究. *岩石学报*, 22(T): 1833—1844.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2003. 南苏鲁造山带的超高压变质岩及岩石化学研究. *地质学报*, 77(4): 478—491.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔 (100~2 050 m) 榴辉岩岩石化学研究. *岩石学报*, 20(1): 27—42.
- 张泽明, 张金凤, 游振东, 等, 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T-t 轨迹. *岩石学报*, 21(2): 257—270.