

威海地区超高压变质花岗片麻岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究

唐 俊, 郑永飞*, 吴元保, 龚 冰

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

摘要: 在苏鲁超高压变质带东北端山东威海地区皂埠镇发现锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低至 -7.8% 左右的花岗片麻岩, 与前人在苏鲁超高压变质带西南端江苏东海青龙山地区发现的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-7\% \sim -9\%$ 左右的花岗片麻岩一致。对这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值花岗片麻岩进行了锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年和系统的激光氟化法矿物氧同位素分析, 结果对低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石成因和花岗片麻岩的原岩性质提供了制约。研究得到: (1) 这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石以新元古代岩浆锆石为主, 但部分岩浆锆石在印支期超高压变质作用过程中发生了不同程度的重结晶作用。 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.08% 的岩浆核锆石 U-Pb 定年得到的花岗片麻岩原岩谐和年龄和不一致线上交点年龄分别为 $(760 \pm 49)\text{Ma}$ 和 $(751 \pm 27)\text{Ma}$, 变质谐和年龄和一致线下交点年龄分别为 $(232 \pm 4)\text{Ma}$ 和 $(241 \pm 33)\text{Ma}$, 指示其原岩为新元古代花岗岩并经历了印支期变质作用; (2) 锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值在局部范围内变化于 $-7.76\% \sim 5.40\%$ 之间, 低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆锆石表明它们是从新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆中直接结晶形成, 锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值的局部变化表明其原岩岩浆的氧同位素组成具有不均一性, 指示低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆源区物质曾经在地表与极度亏损 ^{18}O 的大气降水发生过不同程度的高温水岩反应; (3) 低 $\delta^{18}\text{O}$ 值花岗片麻岩在印支期板块俯冲和折返过程中基本没有与外部发生显著的氧同位素交换, 在退变质作用过程中花岗片麻岩内部缓冲流体对原岩岩浆锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值影响不大。威海皂埠镇地区和东海青龙山地区的花岗片麻岩在原岩时代、变质时代和氧同位素组成等方面基本相同, 指示它们应具有相同的原岩性质, 并经历了相同的变质作用和水岩相互作用过程。因此, 极度亏损 ^{18}O 的新元古代双峰式基性—酸性岩浆岩可能分布于整个大别—苏鲁造山带。

关键词: 苏鲁造山带; 超高压变质岩; 锆石 U-Pb 定年; 氧同位素; 原岩性质。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2005)06-0692-15

收稿日期: 2005-07-21

A Study of Zircon U-Pb Dating and Oxygen Isotopes in UHP Granitic Gneiss from the Weihai Region in Northeast Sulu

TANG Jun, ZHENG Yong-fei*, WU Yuan-bao, GONG Bing

CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Extremely ^{18}O -depleted zircons from granitic gneisses, with $\delta^{18}\text{O}$ values as low as -7.8% , were found in the Zaobuzhen area in the Weihai region, at the northeastern end of the Sulu orogen. SHRIMP zircon U-Pb ages and the oxygen isotope compositions were determined for the low $\delta^{18}\text{O}$ zircons. CL images reveal that the low $\delta^{18}\text{O}$ zircons are primarily of igneous origin, but some grains underwent metamorphic recrystallization. The igneous zircons from a granitic gneiss sample yield a concordant U-Pb age of $(760 \pm 49)\text{Ma}$ and an upper intercepted age of $(751 \pm 27)\text{Ma}$, indicating a protolith of Middle Neoproterozoic age. Metamorphic zircons from the same sample yield a concordant U-Pb age of $(232 \pm 4)\text{Ma}$ and a lower intercepted age of $(241 \pm 33)\text{Ma}$, pointing to Triassic UHP metamorphism. Most of the igneous zircons have unusually variable $\delta^{18}\text{O}$ values of -7.76% to 5.40% , indicating that the gneiss protolith was intruded as low $\delta^{18}\text{O}$ magma that was generated by the partial melting of altered rocks, which suffered intensive water-rock interaction with a low $\delta^{18}\text{O}$ fluid at high tem-

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40334036); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-141)。

作者简介: 唐俊(1965—), 男, 博士, 地球化学专业。* 通信作者: 郑永飞, E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn

peratures during the Neoproterozoic. The preservation of extreme ^{18}O -depletion in the zircons suggests that there is no remarkable oxygen isotope exchange between the metagranite and the mantle during the processes of Triassic subduction and exhumation. The protolith nature, metamorphic timing and oxygen isotope compositions of the granitic gneisses in the Weihai region are similar to those of granitic gneisses in the Qinglongshan area in the southwestern part of the Sulu orogenic belt, indicating that the gneisses along the Sulu orogenic belt share the same nature of protolith origin, water-rock interaction and UHP metamorphism. The present study provides tight constraints not only on the origin of extremely ^{18}O -depleted zircons, but also on the protolith nature of granitic gneisses in the Sulu orogenic belt.

Key words: Sulu orogen; UHP metamorphic rocks; zircon U-Pb dating; oxygen isotope; protolith nature.

对大别—苏鲁造山带超高压变质岩的系统矿物氧同位素研究,发现它们都不同程度地亏损 ^{18}O (Baker *et al.*, 1997; Yui *et al.*, 1997; Zheng *et al.*, 1998, 1999, 2001, 2003; Rumble *et al.*, 2000),其中苏北东海县青龙山榴辉岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低达 -10% (Yui *et al.*, 1995; Zheng *et al.*, 1996, 1998; Rumble and Yui, 1998),指示这些变质岩的原岩在板块俯冲之前曾经与地表水发生过强烈的高温大气降水热液蚀变作用。Zheng *et al.* (2004)对整个造山带不同等级变质岩的系统锆石 U-Pb 定年和氧同位素分析表明,花岗片麻岩和榴辉岩的原岩为新元古代中期 700~800 Ma 双峰式火成岩,它们在侵位过程中不仅发生了高温大气降水热液蚀变,而且低 $\delta^{18}\text{O}$ 蚀变岩石重熔形成低 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆,在扬子板块北缘整个水岩反应的范围超过 20 000 km^2 。进一步,这些作者推测,这种大规模的 ^{18}O 亏损事件形成于新元古代中期大陆裂谷环境,其成因与新元古代 Rodinia 超大陆裂解和全球性冰川事件有关,而高温水岩反应的流体主要来源于极度亏损 ^{18}O 的寒冷气候大气降水或冰川融水。

将锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究相结合,能够对变质岩的原岩性质提供有效制约 (Zheng *et al.*, 2004)。氧在锆石中的扩散速率极低 (Watson and Cherniak, 1997; Zheng and Fu, 1998),所以锆石具有较高的氧同位素封闭温度。锆石可以不受后期亚固相条件下高温热液蚀变作用和麻粒岩相变质作用的影响 (Zheng *et al.*, 2004),因此能够提供变质岩原岩的氧同位素信息。大别—苏鲁造山带变质岩锆石普遍亏损 ^{18}O (Zheng *et al.*, 2004),多数锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于地幔值 $5.3\% \pm 0.3\%$ (Valley *et al.*, 1998)。胶东地块东部花岗片麻岩和榴辉岩中的锆石也显著亏损 ^{18}O (唐俊等, 2004),与大别造山带和苏鲁造山带西南部东海—青岛等地超高压变质岩区域性 ^{18}O 亏损现象一致。因此大别—苏鲁超高压变质带 ^{18}O 亏损范围可从青岛地区进一步扩大至荣成和威

海等地区, ^{18}O 亏损面积应超过 30 000 km^2 。

江苏东海青龙山地区位于苏鲁超高压变质带西南端,这里花岗片麻岩中的锆石极度亏损 ^{18}O ,锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值可低至 $-7\% \sim -9\%$ (Rumble *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2004)。在本次研究中,我们首次在胶东地块东部、苏鲁超高压变质带东北端的山东威海市皂埠镇发现锆石极度亏损 ^{18}O 的花岗片麻岩,其中锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值可低至 -7.8% ,与苏北东海青龙山花岗片麻岩中的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值非常相似,表明威海地区也存在着与青龙山地区类似的水岩相互作用。本文对这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石进行了详细的 CL 结构分析、SHRIMP U-Pb 定年和系统的氧同位素分析,并对这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值花岗片麻岩的分布范围作了初步研究。研究结果不仅有助于研究大别—苏鲁超高压变质带变质岩中低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石成因机制,而且能够为研究这些变质岩的原岩性质、变质作用特征、水岩相互作用特征以及陆壳深俯冲过程中的流体活动等方面提供新的同位素地球化学证据。

1 地质背景和样品描述

胶东地块位于山东省东部,西侧以郯庐断裂带(在山东境内也称沂沭断裂带)为界与鲁西地体相邻。以五莲—烟台断裂为界,可将胶东地块进一步分成东部地区和西部地区两部分,二者在前寒武纪变质岩结晶基底的成因和演化等方面有着明显的差异。胶东地块西部的前寒武纪结晶基底以晚太古代—古元古代 TTG 片麻岩为主,其原岩时代为 1.9~2.7 Ga,在 1.8 Ga 左右遭受到一次强烈的变质作用 (陆松年, 1998; Wallis *et al.*, 1999; Zhai *et al.*, 2000)。胶东地块东部位于大别—苏鲁超高压变质带的东北段,属于扬子板块北缘,出露的前寒武纪结晶基底以新元古代花岗片麻岩为主,其原岩时代在 700~800 Ma 左右,在印支期 230~240 Ma 左右

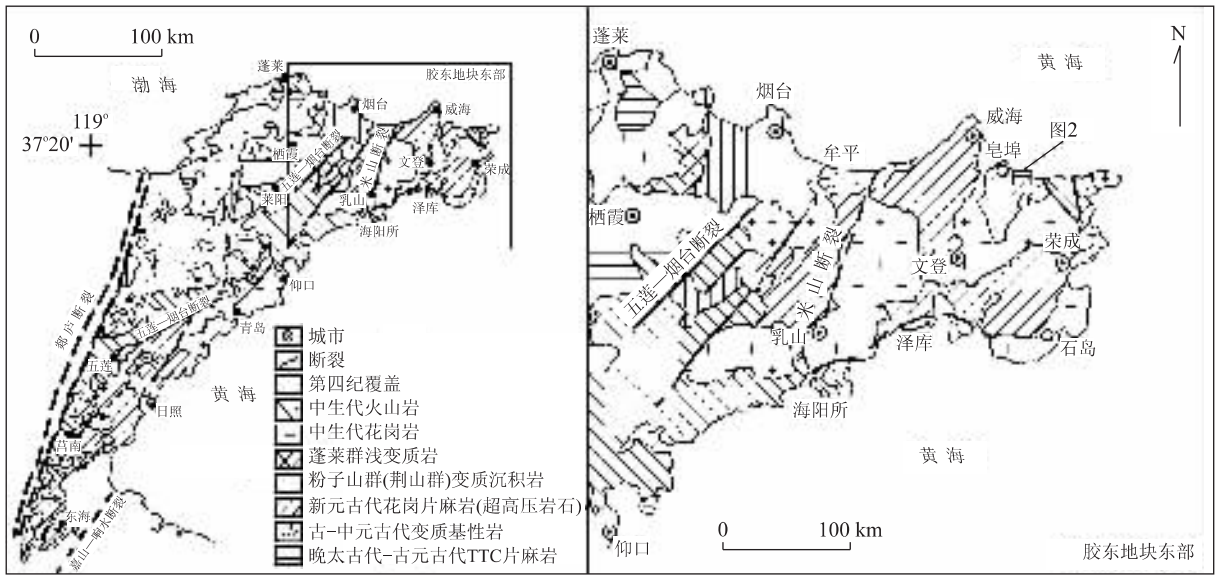


图 1 胶东地块东部地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of the eastern part of Shandong peninsula

遭到强烈的超高压—高压变质作用 (Ames *et al.*, 1996; Hacker *et al.*, 1998; Li *et al.*, 1999; Zheng *et al.*, 2003, 2004).

胶东地块东部地区出露的岩石类型以新元古代花岗岩片麻岩和中生代花岗岩为主. 在花岗质片麻岩中分布有大量的榴辉岩包体, 而且还分布有一些规模较大的古—中元古代沉积变质地层透镜体及少量超基性岩包体. 在威海成山角附近分布有少量白垩纪青山群中酸性火山岩(图 1), 研究区内 NE、NNE 向断裂构造发育(山东省地矿局区调队四分队, 1992).

胶东地块东部大规模出露的花岗片麻岩主要岩性以黑云母二长花岗质和黑云母钾长花岗质为主, 局部发育花岗闪长质片麻岩, 片麻理呈 NE 向展布, 与区域构造线方向一致. 片麻理产状主要倾向南、东南和东等方向, 倾角多数大于 50°(山东省地矿局区调队四分队, 1992; 宋明春等, 1995; 孙景贵和胡克, 1997). 已有的定年结果显示, 锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄在 700~800 Ma 左右, 指示花岗片麻岩的原岩形成于新元古代(Ames *et al.*, 1996; 王沛成和安郁宏, 1996; 唐俊等, 2004).

胶东地块东部含柯石英榴辉岩的分布范围较广, 在威海和荣成等地均有出露. 榴辉岩有 3 种产出形式, 其中多数呈规模不等的透镜状产于花岗片麻岩中(G 类), 部分榴辉岩呈小的扁豆状产于大理岩中(M 类), 在荣成迟家店地区有少量榴辉岩呈小的透镜体产于石榴石二辉橄榄岩中(P 类)(叶凯和徐

平, 1992; Hiramatsu *et al.*, 1995; 王来明等, 1995; Jahn *et al.*, 1996). 已有的锆石 U-Pb 新结果指示, 榴辉岩变质年龄在 210~230 Ma 左右, 表明胶东地块东部超高压变质作用时代为印支期 (Ames *et al.*, 1996; Yang *et al.*, 2003; 唐俊等, 2004). 榴辉岩原岩年龄目前有两组: 一组年龄为 700~800 Ma 左右, 与围岩花岗片麻岩的原岩形成年龄一致(王来明等, 1994); 另一组年龄在 1 800 Ma 左右 (Yang *et al.*, 2003; 唐俊等, 2004). 详细的岩相学研究表明, 胶东地块东部的榴辉岩在榴辉岩相变质作用和角闪岩相变质作用之间, 普遍遭受一次短暂的中压麻粒岩相变质作用 (Wang *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 1995, 2003; Banno *et al.*, 2000; Nakamura and Hirajima, 2000).

胶东地块东部大规模出露的另一种主要岩石类型为中生代印支期和燕山期花岗岩, 其中规模较大的岩体有印支期石岛正长质—花岗质复式岩体 (Chen *et al.*, 2003b; 高天山等, 2004; Yang *et al.*, 2005) 和文登二长花岗质复式岩体 (刘春华等, 1995)、燕山期昆仑山花岗闪长质—二长花岗质复式岩体 (徐洪林等, 1997) 和伟德山辉石二长闪长质—石英二长花岗质复式岩体 (山东省地矿局区调队四分队, 1992).

本次研究的 7 个花岗片麻岩样品均位于威海地区皂埠镇沙龙王村附近(图 2), 其中 03SD27 为拣块样品, 04SD01 和 04SD02 位于海滩边, 二者相距

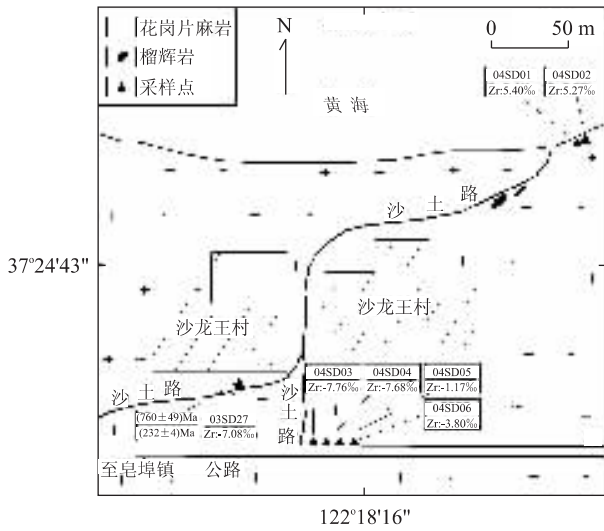


图 2 威海地区皂埠镇花岗片麻岩样品分布

Fig. 2 Sketch map of granitic gneiss sample locality at Zaobuzhen area in the Weihai region, eastern part of the Shandong peninsula

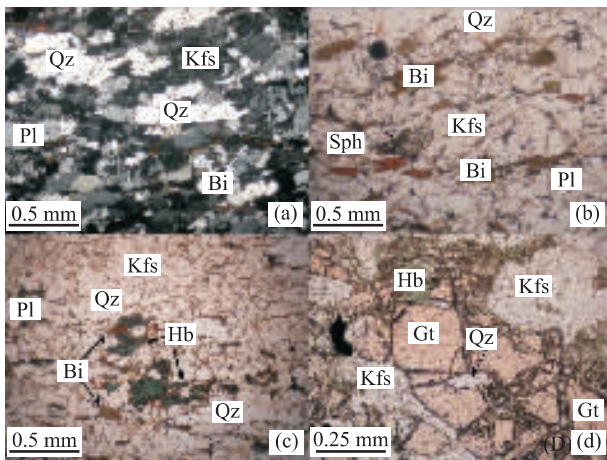


图 3 威海地区皂埠镇花岗片麻岩显微照片

Fig. 3 Photomicrograph of granitic gneiss at Zaobuzhen area in the Weihai region, eastern part of the Shandong peninsula

a. 03SD27(正交偏光), 浅色矿物石英和长石呈他形不规则状, 石英和长石被定向拉长, 钾长石发育格子双晶, 部分石英裂隙发育, 具波状消光, 总体具韧性剪切结构特征, 暗色矿物角闪石和黑云母也具有明显的定向性; b. 04SD03(单偏光), 花岗片麻岩中呈定向排列的黑云母, 见有半自形磷石膏零星分布于黑云母附近, 浅色矿物也具有一定的定向性; c. 03SD27(单偏光), 花岗片麻岩中角闪石被黑云母交代, 角闪石和黑云母均定向分布; d. 03SD27(单偏光), 花岗片麻岩中零星分布于长石附近的红褐色石榴石, 石榴石内部见有来自于花岗片麻岩中残留的石英包裹体, 表明石榴石应该是在变质过程中形成。矿物符号: Qz, 石英; Kfs, 钾长石; Pl, 斜长石; Bi, 黑云母; Hb, 角闪石; Gt, 石榴石; Sph, 磷石膏

3 m, 其他 4 个样品 04SD03~04SD06 采自村口一条公路剖面, 该公路剖面位于 04SD01 和 04SD02 采样位置南部约 300 m, 剖面走向近东-西向, 长度约 55 m。这 7 个样品的岩性均为黑云母二长花岗片麻岩, 浅色矿物以石英、钾长石和斜长石为主, 矿物颗粒一般呈半自形至他形不规则状, 粒径一般变化于 0.2~2 mm 之间(图 3a), 浅色含量超过 80%。暗色矿物以黑云母为主, 局部见有角闪石及石榴石分布, 黑云母和角闪石定向排列(图 3b、3c), 石榴石为红褐色, 粒径一般变化于 0.2~1 mm, 内部见有石英包裹体(图 3d), 暗色矿物含量小于 20%。矿物组合为石英+钾长石+斜长石±黑云母±角闪石±绿帘石±石榴石±磷灰石±锆石±榍石±磁铁矿。该处花岗片麻岩片麻理发育, 不仅暗色矿物具有明显的定向性, 许多浅色矿物如石英和长石也被定向拉长, 具有韧性剪切特征(图 3a、3b)。本文对样品 03SD27 中的锆石作了 CL 结构分析和 SHRIMP 法 U-Pb 定年, 并对 7 个样品作了系统的单矿物氧同位素分析。

2 分析方法

全岩样品采用无污染玛瑙球磨技术磨碎至 200 目, 单矿物的分选则先将岩石样品机械破碎到 80~100 目, 然后采用摇床、磁法、电磁法及重液等选矿技术将各种矿物逐一分离, 最后在双目镜下将单矿物提纯, 使其纯度大于 98%。

在锆石定年测定前, 先对锆石进行阴极发光 (CL) 显微结构分析, 了解锆石内部结构特征并确定年龄分析点位置。CL 照像工作在北京中国地质科学院矿床资源研究所电子探针室进行。锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年工作在北京中国地质科学院离子探针中心 SHRIMP II 仪器上进行, 将待测定的锆石颗粒与工作标准锆石 TEM(417 Ma) 一起粘贴在环氧树脂表面, 然后进行抛光和镀金, 定年工作开始前先采用 Sri Lanka 伟晶岩中锆石 SL13 (572 Ma) 进行工作标准校正, 有关分析流程和仪器工作参数参考文献 Compston *et al.* (1992) 和宋彪等(2002)。所有年龄结果均以 ^{204}Pb 含量作了普通铅校正。

单矿物激光氟化法氧同位素分析在中国科学技术大学化学地球动力学研究实验室进行。化学提取采用激光氟化技术, 利用 MIR-10 型 25 W 的 CO_2 激光器对 1.5~2.0 mg 的单矿物颗粒加热, 并在真

表 1 威海地区皂埠镇花岗片麻岩 03SD27 锆石 SHRIMP U-Pb 同位素数据

Table 1 SHRIMP zircon U-Pb isotope data for granitic gneiss 03SD27 at Zaobuzhen in the Weihai region

分析点	元素含量/ 10^{-6} 及比值					表面年龄/Ma					
	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	U	Th	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
1.1	0.10	1123	686	0.63	121	762	10	727	15	623	100
1.2	0.14	896	512	0.59	101	792	11	765	21	800	14
2.1	0.30	1240	5	0.00	39.5	234	3	222	43		
2.2	2.05	1765	119	0.07	74.6	303	4	449	140	628	120
2.3	0.41	779	4	0.00	24.8	234	4	215	69		
3.1	0.35	434	200	0.48	44.2	720	10	737	34	814	18
3.2	0.28	703	363	0.53	77.4	774	11	769	27	711	72
4.1	0.22	425	175	0.43	39.7	664	10	752	29	820	28
4.2	1.00	224	37	0.17	12.4	399	7	489	97	670	48
5.1	0.66	771	8	0.01	24.2	229	4	225	93		

分析点	同位素比值							
	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$
1.1	7.97	1.4	0.063 57	0.7	1.100 011 5	1.6	0.125 5	1.4
1.2	7.65	1.5	0.064 72	0.9	1.166 313 7	1.8	0.130 7	1.5
2.1	27.06	1.5	0.050 59	1.8	0.257 808 9	2.4	0.036 96	1.5
2.2	20.77	1.5	0.055 9	6.6	0.371 192 8	6.7	0.048 16	1.5
2.3	27.05	1.6	0.050 43	2.9	0.257 063 1	3.3	0.036 97	1.6
3.1	8.46	1.5	0.063 9	1.6	1.041 404 9	2.2	0.118 2	1.5
3.2	7.83	1.5	0.064 83	1.2	1.140 585 8	1.9	0.127 6	1.5
4.1	9.21	1.5	0.064 31	1.4	0.962 076 3	2.0	0.108 5	1.5
4.2	15.67	1.7	0.056 94	4.3	0.500 886 6	4.7	0.063 8	1.7
5.1	27.61	1.5	0.050 65	3.9	0.252 946 8	4.2	0.036 22	1.5

Pb_c 代表普通铅; Pb^* 代表放射成因铅; 利用测定的 ^{204}Pb 校正普通铅。

空条件下与 BrF_5 反应, 所得到的 O_2 直接在 Delta+ 气体质谱仪上进行氧同位素比值测定 (Zheng *et al.*, 2002; 龚冰和郑永飞, 2003), 分析结果以相对于 SMOW 标准的 $\delta^{18}\text{O}$ 标记报道, 全流程分析误差小于 $\pm 0.1\%$ (1σ)。在激光氟化法分析过程中采用了 3 个参照标准: (1) 石榴石 UWG-2, $\delta^{18}\text{O} = 5.8\% \pm 0.1\%$; (2) 石英 GBW04409, $\delta^{18}\text{O} = 11.11\% \pm 0.1\%$; (3) 锆石 91500, $\delta^{18}\text{O} = 10.0\% \pm 0.1\%$ 。为保证数据的可靠性, 对所有的单矿物样品均进行了重复测定, 结果 $\delta^{18}\text{O}$ 值误差均小于 $\pm 0.1\%$ (1σ)。

3 锆石 U-Pb 年龄

样品 03SD27 中的锆石晶体大小在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 左右, 晶形以自形长柱状为主, 少数为自形短柱状, 柱面和锥面均较发育, 长短轴之比为 $2:1 \sim 4:1$, 具岩浆锆石晶形特征。在 CL 图中 (图 4), 多数锆石具有明显的岩浆环带结构, 且 Th/U 比值较高 (>0.4), 表明这些锆石均为岩浆锆石; 部分岩浆锆石受后期变质重结晶作用影响, 岩浆环带变得模糊或消失, CL 强度呈面状或杂斑状分布, Th/U 比值

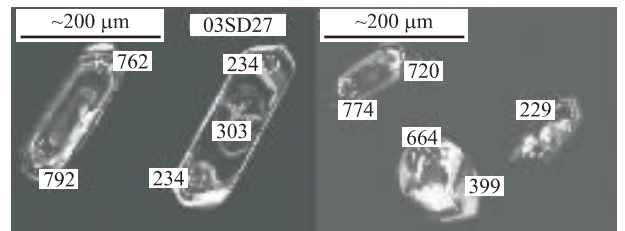


图 4 威海地区皂埠镇花岗片麻岩锆石 CL 照片

Fig. 4 CL images of zircons from granitic gneiss at Zaobuzhen in the Weihai region

较低 (<0.2), 具变质重结晶锆石特征。对其中的 5 粒锆石总共分析了 10 个点 (表 1, 图 4), 其中有 4 个分析点均位于不一致线上交点谐和线上, 其他 6 个分析点由于受后期不同程度变质重结晶作用影响而沿不一致线分布 (图 5), 该不一致线上交点和下交点年龄分别为 $(751 \pm 27) \text{Ma}$ 和 $(241 \pm 33) \text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.3$)。分布于不一致线上交点处谐和线上的 4 个点 $T_{206/238}$ 加权平均年龄为 $(760 \pm 49) \text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 8.7$), 与不一致线上交点年龄在误差范围内一致, 该组谐和年龄应指示片麻岩原岩形成时间。位于下交点谐和线上 3 个完全重结晶锆石分析点的 $T_{206/238}$ 加权平均年龄为 $(232 \pm 4) \text{Ma}$

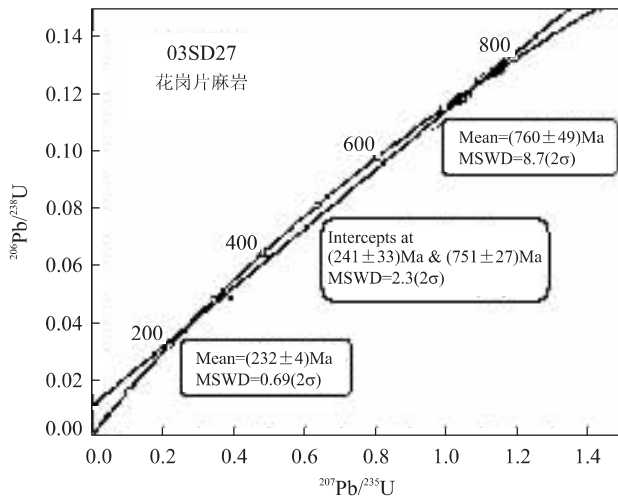


图 5 威海地区皂埠镇花岗片麻岩锆石 U-Pb 谐和曲线图

Fig. 5 U-Pb concordant diagram of zircons from granitic gneiss at Zaobuzhen in the Weihai region

(MSWD=0.69), 也与不一致线下交点年龄在误差范围内一致, 该组谐和年龄应代表超高压变质作用时间。

4 氧同位素

威海皂埠镇花岗片麻岩单矿物的氧同位素测试结果以及石英—矿物对的氧同位素温度见表 2, 其中全岩值根据样品中主要矿物含量估算得出。为了验证全岩估计值的准确性, 对样品 03SD27 的全岩粉末进行了实测, 实测值与估计值结果非常接近, 说明本文全岩估计值基本可靠。原岩岩浆估计值范围由岩浆锆石值推算得出, 酸性岩浆与锆石在 750~850 °C 温度条件下的平衡分馏值为 1.9‰~2.5‰, 推算方法参考 Zheng (1993a)、Valley *et al.* (1994) 和 Zhao and Zheng (2003) 等文献。氧同位素温度计算根据 Zheng 的增量方法 (Zheng, 1991, 1993a, 1993b), 温度计算的误差为 ±30~50 °C。图 6 为花岗片麻岩石英—矿物对的 $\delta^{18}\text{O}$ — δ 图解。

威海皂埠镇花岗片麻岩的氧同位素变化范围较大 (表 2), 其中石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -3.30‰~8.83‰, 钾长石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -2.73‰~6.34‰, 斜长石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -2.88‰~6.21‰, 榍石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.14‰, 石榴石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.87‰~-7.38‰, 锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.76‰~5.40‰, 全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 估计值为 -3.0‰~-7.1‰。沙龙王村海滩处的 2 个样品 (04SD01 和 04SD02) 具有相对较高的氧同位素组成, 而且单矿物

和全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较小。沙龙王村口公路剖面的 4 个样品 (04SD03~04SD06) 以及附近的 1 个拣块样品 03SD27 则具有显著的 ^{18}O 亏损特征, 而且单矿物和全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较大, 尤其是锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化于 -7.76‰~-1.17‰, 均明显低于地幔锆石值 5.3‰±0.3‰ (Valley *et al.*, 1998) 的范围; 与锆石相比, 石英、钾长石、斜长石、磁铁矿等单矿物以及全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围相对较小一些。

位于沙龙王村海滩处的 2 个花岗片麻岩样品 04SD01 和 04SD02 的单矿物基本处于不同变质条件下的氧同位素平衡状态 (表 2, 图 6)。其中石英—钾长石矿物对的氧同位素温度在 300~330 °C 之间, 石英—斜长石矿物对的氧同位素温度在 325~360 °C 之间, 石英—磁铁矿矿物对的氧同位素温度在 480~545 °C 之间, 表明长石和磁铁矿等矿物在角闪岩相退变质作用过程中达到并基本保持了氧同位素平衡状态。石英—锆石矿物对的氧同位素温度在 665~720 °C 之间, 略低于花岗岩 750~850 °C 岩浆结晶温度, 说明石英在岩浆冷却和/或变质作用过程中与其他矿物发生了氧同位素交换, 导致石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值略有上升。

位于沙龙王村口处的 5 个花岗片麻岩样品 (公路剖面中的 4 个样品 04SD03~04SD06 和剖面附近的 1 个拣块样品 03SD27) 中的部分单矿物也处于不同变质条件下的氧同位素平衡状态 (表 2, 图 6)。其中 2 个石英—石榴石矿物对的氧同位素温度在 465~600 °C 之间, 石英—榍石矿物对的氧同位素温度为 655 °C, 表明部分石榴石和榍石达到并保存了榴辉岩相变质作用条件下的氧同位素平衡状态; 4 个石英—磁铁矿的氧同位素温度在 480~560 °C 之间, 表明磁铁矿在角闪岩相退变质作用过程中达到并保存了氧同位素平衡状态; 5 个石英—锆石矿物对中只有样品 04SD06 给出了 830 °C 的平衡温度, 与花岗岩 800~900 °C 岩浆结晶温度基本一致, 另有 3 个样品 03SD27、04SD03 和 04SD04 给出了 465~635 °C 的较低温度, 说明石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在后期变质作用过程中也受到了不同程度的改造。样品 04SD05 中的石英和锆石的氧同位素分馏出现倒转现象, 说明相对锆石而言, 该样品的石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值在原岩 (花岗岩) 形成之后被强烈化学再造, 导致石英与锆石处于明显的氧同位素不平衡状态。5 个样品中石英与钾长石和斜长石也明显处于氧同位素不平衡状态, 其中多数石英—长石的氧同位素分馏出现倒转 (表 2,

表 2 威海地区皂埠镇花岗片麻岩全岩和单矿物氧同位素组成及温度

Table 2 Oxygen isotope compositions of mineral separates and whole rocks of granitic gneiss at Zaobuzhen in Weihai region and estimated temperatures

样品编号	采样位置	矿物名称	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	矿物对	$\Delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	表观温度/ $^{\circ}\text{C}$
03SD27	沙龙王村口(拣块)	全岩	-3.0 (-2.7)			
03SD27	沙龙王村口(拣块)	岩浆估计值	-5.2~-4.6			
03SD27	沙龙王村口(拣块)	石英	-3.30			
03SD27	沙龙王村口(拣块)	钾长石	-2.73	Qz-Kfs	-0.57	不平衡
03SD27	沙龙王村口(拣块)	斜长石	-2.88	Qz-Pl	-0.42	不平衡
03SD27	沙龙王村口(拣块)	楣石	-7.14	Qz-Sph	3.84	655
03SD27	沙龙王村口(拣块)	石榴石	-7.38	Qz-Gt	4.08	600
03SD27	沙龙王村口(拣块)	锆石	-7.08	Qz-Zr	3.78	635
04SD01	沙龙王村海滩	全岩	7.0			
04SD01	沙龙王村海滩	岩浆估计值	7.3~7.9			
04SD01	沙龙王村海滩	石英	8.62			
04SD01	沙龙王村海滩	钾长石	6.31	Qz-Kfs	2.31	330
04SD01	沙龙王村海滩	斜长石	6.21	Qz-Pl	2.41	360
04SD01	沙龙王村海滩	锆石	5.40	Qz-Zr	3.22	720
04SD01	沙龙王村海滩	磁铁矿	0.99	Qz-Mt	7.63	545
04SD02	沙龙王村海滩	全岩	7.1			
04SD02	沙龙王村海滩	岩浆估计值	7.2~7.8			
04SD02	沙龙王村海滩	石英	8.83			
04SD02	沙龙王村海滩	钾长石	6.34	Qz-Kfs	2.49	300
04SD02	沙龙王村海滩	斜长石	6.19	Qz-Pl	2.64	325
04SD02	沙龙王村海滩	锆石	5.27	Qz-Zr	3.56	665
04SD02	沙龙王村海滩	磁铁矿	0.02	Qz-Mt	8.81	480
04SD03	沙龙王村口公路剖面	全岩	-2.2			
04SD03	沙龙王村口公路剖面	岩浆估计值	-5.9~-5.3			
04SD03	沙龙王村口公路剖面	石英	-2.48			
04SD03	沙龙王村口公路剖面	钾长石	-1.41	Qz-Kfs	-1.07	不平衡
04SD03	沙龙王村口公路剖面	斜长石	-2.72	Qz-Pl	0.24	不平衡
04SD03	沙龙王村口公路剖面	石榴石	-7.87	Qz-Gt	5.39	465
04SD03	沙龙王村口公路剖面	锆石	-7.76	Qz-Zr	5.28	465
04SD03	沙龙王村口公路剖面	磁铁矿	-10.79	Qz-Mt	8.31	505
04SD04	沙龙王村口公路剖面	全岩	-1.0			
04SD04	沙龙王村口公路剖面	岩浆估计值	-5.8~-5.2			
04SD04	沙龙王村口公路剖面	石英	-3.05			
04SD04	沙龙王村口公路剖面	钾长石	0.45	Qz-Kfs	-2.60	不平衡
04SD04	沙龙王村口公路剖面	斜长石	-0.35	Qz-Pl	-2.70	不平衡
04SD04	沙龙王村口公路剖面	锆石	-7.68	Qz-Zr	4.63	530
04SD04	沙龙王村口公路剖面	磁铁矿	-10.44	Qz-Mt	7.39	560
04SD05	沙龙王村口公路剖面	全岩	-2.4			
04SD05	沙龙王村口公路剖面	岩浆估计值	0.7~1.3			
04SD05	沙龙王村口公路剖面	石英	-2.45			
04SD05	沙龙王村口公路剖面	钾长石	-2.19	Qz-Kfs	-0.26	不平衡
04SD05	沙龙王村口公路剖面	斜长石	-2.64	Qz-Pl	0.19	不平衡
04SD05	沙龙王村口公路剖面	锆石	-1.17	Qz-Zr	-1.28	不平衡
04SD05	沙龙王村口公路剖面	磁铁矿	-10.32	Qz-Mt	7.87	530
04SD06	沙龙王村口公路剖面	全岩	-1.3			
04SD06	沙龙王村口公路剖面	岩浆估计值	-1.2~-1.8			
04SD06	沙龙王村口公路剖面	石英	-1.14			
04SD06	沙龙王村口公路剖面	钾长石	-0.90	Qz-Kfs	-0.24	不平衡
04SD06	沙龙王村口公路剖面	斜长石	-1.79	Qz-Pl	0.65	不平衡
04SD06	沙龙王村口公路剖面	锆石	-3.80	Qz-Zr	2.66	830
04SD06	沙龙王村口公路剖面	磁铁矿	-9.35	Qz-Mt	8.21	510

矿物符号: Qz. 石英; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Gt. 石榴石; Mt. 磁铁矿; Sph. 楣石; 全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值根据主要单矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 值和矿物含量计算得出, 括号内的数值为全岩粉末实测值; 氧同位素温度计算根据 Zheng 的增量方法 (Zheng, 1991, 1993a, 1993b); 原岩岩浆估计值根据锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值推算得出, 推算公式根据 Zheng (1993a)、Valley *et al.* (1994) 和 Zhao and Zheng (2003) 等文献。

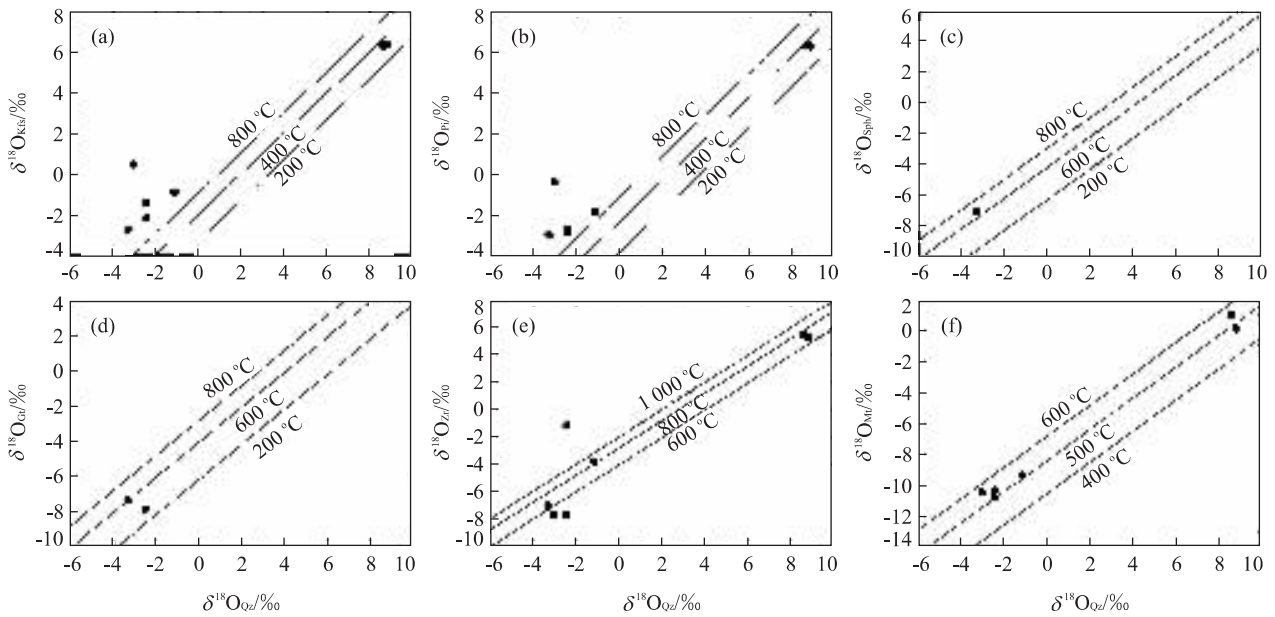


图 6 威海地区皂埠镇花岗片麻岩石英—矿物对 δ - δ 图解

Fig. 6 δ - δ plot between minerals and quartz from granitic gneisses at Zaobuzhen in the Weihai region

图 6,9), 表明在角闪岩相变质作用之后, 该花岗片麻岩剖面中的钾长石和斜长石又与后期流体在亚固相条件下发生了不同程度的氧同位素交换, 导致长石 $\delta^{18}\text{O}$ 值不同程度的升高。

5 讨论

5.1 花岗片麻岩的原岩时代和变质时代

对威海地区皂埠镇花岗片麻岩中锆石 CL 结构分析表明, 这些锆石主要由原岩岩浆锆石和变质重结晶锆石组成, SHRIMP 锆石 U-Pb 定年给出的谐和年龄和不一致线上交点年龄分别为 $(760 \pm 49)\text{Ma}$ 和 $(751 \pm 27)\text{Ma}$ (图 5)。Ames *et al.* (1996) 对威海地区 2 个花岗片麻岩采用 TIMS 法锆石 U-Pb 定年, 得出的不一致线上交点年龄分别为 $(782 \pm 32)\text{Ma}$ 和 $(728 \pm 25)\text{Ma}$ 。唐俊等 (2004) 对威海地区和文登地区 3 个花岗片麻岩采用 LA-ICPMS 法锆石 U-Pb 定年, 得出的 2 个原岩谐和年龄和 1 个不一致线上交点年龄分别为 $(723 \pm 36)\text{Ma}$ 、 $(738 \pm 17)\text{Ma}$ 和 $(744 \pm 63)\text{Ma}$ 。本文 SHRIMP 法锆石 U-Pb 定年结果与 Ames *et al.* (1996) 和唐俊等 (2004) 的定年结果在误差范围内基本一致, 表明胶东地块东部超高压变质带中花岗片麻岩的原岩主要形成于新元古代中期。本文结果不仅与东海青龙山地区花岗片麻岩原岩时代 $(702 \pm 130)\text{Ma} \sim 754\text{Ma}$

(Rumble *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2004) 完全一致, 而且也与整个大别—苏鲁高压—超高压变质带中花岗片麻岩 700~800 Ma 原岩时代基本相同 (Ames *et al.*, 1996; Rowley *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 2003, 2004)。

岩石学和年代学证据表明, 大别—苏鲁造山带中新元古代花岗片麻岩和榴辉岩共同经历了印支期超高压变质作用 (Wang *et al.*, 1993; Carswell *et al.*, 2000; Ye *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2003, 2004)。本文获得的变质谐和年龄和不一致线下交点年龄分别为 $(232 \pm 4)\text{Ma}$ 和 $(241 \pm 33)\text{Ma}$ (图 5), 不仅与唐俊等 (2004) 在胶东地块东部花岗片麻岩中获得的 3 个变质谐和年龄 $(217 \pm 22)\text{Ma}$ 、 $(232 \pm 4)\text{Ma}$ 和 $(227 \pm 12)\text{Ma}$ 在年龄误差范围内完全一致, 而且与江苏东海青龙山花岗片麻岩中的 1 个变质谐和年龄 221 Ma (Rumble *et al.*, 2002) 和 1 个不一致线下交点年龄 $(218 \pm 16)\text{Ma}$ (Zheng *et al.*, 2004) 也基本一致。指示胶东地块东部新元古代花岗片麻岩遭受超高压变质作用的时代与大别—苏鲁造山带中榴辉岩超高压变质作用时代 220~240 Ma (Ames *et al.*, 1996; Li *et al.*, 1999; Ayers *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2003) 完全一致。

5.2 花岗片麻岩低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石成因

因为氧在锆石中的扩散速率极低 (Watson and Cherniak, 1997; Zheng and Fu, 1998), 所以锆石

具有较高的氧同位素封闭温度. 实验及理论研究均表明, 在亚固相条件下的水—岩相互作用过程中, 要使 $100\ \mu\text{m}$ 大小的锆石发生氧同位素再造需要几十甚至几百个百万年以上的持续时间, 这个时间长度在自然界是不太可能出现的 (Zheng *et al.*, 2004). 对曾经经历过麻粒岩相变质作用和亚固相高温热液蚀变的岩石氧同位素研究也证实, 其中的锆石能够很好地保存其初始氧同位素组成 (Valley *et al.*, 1994; King *et al.*, 1998; Peck *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2004). 所以, 锆石可以不受后期高温亚固相 ($<600\ ^\circ\text{C}$) 热液蚀变作用和“无水”麻粒岩相高级变质作用的影响, 能够提供变质岩原岩的氧同位素信息. 但是在超固相条件下的高温 ($>600\ ^\circ\text{C}$) 热液蚀变过程中, 变质岩中的原岩岩浆锆石能否有效保存其初始氧同位素组成还存在着一些争议. Watson and Cherniak (1997) 的实验结果显示, 在超固相高温热液体系中, 锆石发生氧同位素再造的时间会大大缩短. 据此可推算, 在 $700\ ^\circ\text{C}$ 的高温热液蚀变条件下, 粒径在 $100\ \mu\text{m}$ 左右的锆石氧同位素再造的时间只需约 $1\sim 10$ 个百万年 (Zheng *et al.*, 2004), 指示在超固相的高温 ($\geq 700\ ^\circ\text{C}$) 热液蚀变条件下, 变质岩原岩岩浆锆石的氧同位素组成有可能发生改变. 但对于富含水的酸性岩来讲, 温度在 $700\sim 800\ ^\circ\text{C}$ 条件下的超固相高温热液蚀变一般会导致岩石发生部分熔融甚至全部熔融 (Wyllie, 1983, 1995), 因此酸性岩中的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石应该是从低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆中结晶出来的 (Zheng *et al.*, 2004).

大别—苏鲁造山带中新元古代变质岩浆岩 (花岗片麻岩和榴辉岩) 中的锆石显著亏损 ^{18}O (Zheng *et al.*, 2004), 而且多数锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于地幔值 $5.3\text{‰}\pm 0.3\text{‰}$ 的范围. 系统的锆石定年和氧同位素研究表明, 低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石主要形成于新元古代中期 (Rumble *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2004). Zheng *et al.* (2004) 的研究得到, 扬子板块北缘新元古代双峰式 (酸性—基性) 裂谷岩浆活动的时间主要集中在 $700\sim 800\ \text{Ma}$, 其中在 $750\ \text{Ma}$ 左右岩浆活动最强烈. 早期裂谷型岩浆活动可以启动高温大气降水热液蚀变, 形成低 $\delta^{18}\text{O}$ 值热液蚀变岩石; 这些热液蚀变岩石由于富含大量水, 会导致其熔点显著降低 (Wyllie, 1983, 1995). 随着裂谷构造活动的延续, 这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值蚀变岩石 (尤其是酸性蚀变岩石) 可以发生断裂重熔, 从而形成低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆, 并从中结晶出低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆锆石 (Zheng *et al.*, 2004). 大

别地区北淮阳浅变质带中新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆岩的发现 (Zheng *et al.*, 2004; 吴元保等, 2004), 表明这些热液蚀变岩在新元古代的确通过重熔作用形成了低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆, 并从中结晶出低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石. 目前世界其他地区发现的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆岩基本上也都是由低 $\delta^{18}\text{O}$ 值高温热液蚀变岩石通过重熔作用而形成的 (Bacon *et al.*, 1989; Gilliam and Valley, 1997; Balsely and Gregory, 1998; Bindeman and Valley, 2001; Wei *et al.*, 2002).

对胶东地块东部新元古代花岗片麻岩系统的锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究表明 (唐俊等, 2004), 新元古代花岗片麻岩普遍亏损 ^{18}O , 虽然锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有较大的变化范围: $-0.42\text{‰}\sim 6.13\text{‰}$, 但多数锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于地幔值 $5.3\text{‰}\pm 0.3\text{‰}$, 其中低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石变化于 $-0.42\text{‰}\sim 4.14\text{‰}$ 之间, 绝大多数集中在 $3\text{‰}\sim 4\text{‰}$ 左右 (图 7). 无论是低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石还是高 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石均由不同比例的新元古代原岩岩浆锆石和变质重结晶锆石组成, 岩浆核锆石的结晶时代在年龄误差范围内也基本一致, 指示这些以低 $\delta^{18}\text{O}$ 值为主的岩浆核锆石是从新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆中直接结晶形成 (唐俊等, 2004). 从图 8 中可以看出, 胶东地块东部新元古代花岗片麻岩锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与全岩 SiO_2 含量之间没有明显的相关性. 所以引起岩浆锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值发生局部变化的主要原因不是由原岩岩浆侵位时与围岩同化混染所致, 而是指示其原岩岩浆氧同位素组成在局部范围内具有不均一性, 这种不均一性可能继承了其源区岩石氧同位素组成的特点, 是遭受过程度不同的热液蚀变岩石再经受重熔的典型特征 (Taylor and Sheppard, 1986; Taylor, 1986). 但是极度亏损 ^{18}O 的锆石其全岩 SiO_2 含量总体偏高一些, 因此 $\delta^{18}\text{O}$ 值非常低的岩浆在局部范围内存在着同化混染的可能性.

样品 03SD27 中的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.08‰ , CL 结构分析以及 U-Pb 定年结果表明, 这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石同样由原岩岩浆锆石和变质重结晶锆石组成 (图 4, 5), 其中岩浆锆石不仅保存有完好的长柱状晶形, 而且还保存了较清晰的岩浆环带 (图 4); 锆石不仅具有较高的 Th/U 比值 (>0.4) (表 1), 而且多数给出了新元古代 $750\ \text{Ma}$ 左右的谐和年龄 (图 5), 说明这些岩浆锆石的 U-Pb 体系基本未受到后期地质作用的扰动. 与此同时, 也有部分岩浆锆石受印支期超高压变质作用影响而发生了不同程度的重结晶作用. 这些重结晶锆石虽然还保留了较好的长柱状

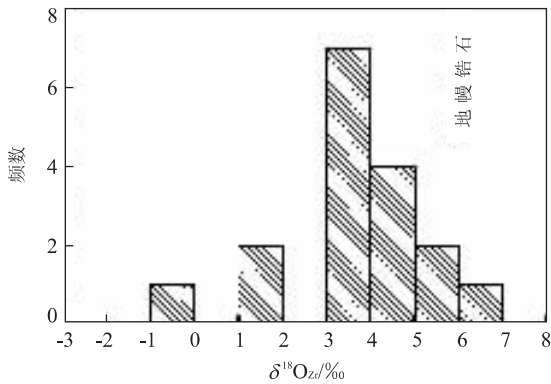


图 7 胶东地块东部新元古代花岗片麻岩锆石 $\delta^{18}O$ 值直方图

Fig. 7 Histogram of the oxygen isotope composition for zircons from the Neoproterozoic granitic gneisses in the eastern part of the Shandong peninsula

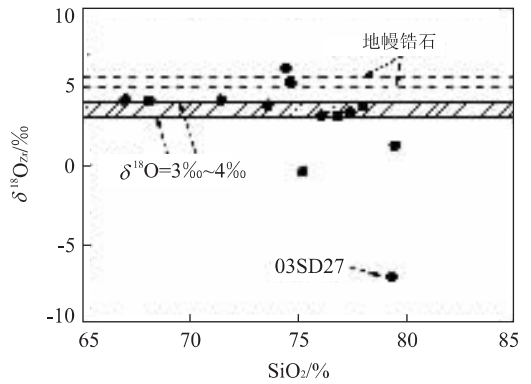


图 8 胶东地块东部新元古代花岗片麻岩锆石 $\delta^{18}O$ 值与全岩 SiO_2 含量相关图

Fig. 8 Diagram of relationship between zircon $\delta^{18}O$ value and whole-rock SiO_2 content for the Neoproterozoic granitic gneisses in the eastern part of the Shandong peninsula

岩浆锆石晶形,但原先的岩浆环带已变得非常模糊甚至消失(图 4)。这些重结晶锆石总体具有较低的 Th/U 比值(<0.2) (表 1), 年龄结果也沿着不一致线分布(图 5), 其中有 3 个分析点给出了超高压变质作用谐和年龄, 说明这些重结晶锆石的 U-Pb 体系在超高压变质作用过程中受到了不同程度的扰动甚至完全重置。对大别—苏鲁地区变质岩锆石微区氧同位素分析表明(Chen *et al.*, 2003a), 原岩岩浆锆石与变质增生或重结晶锆石之间没有明显的氧同位素组成差异; 另外, Rumble *et al.* (2002) 对东海青龙山地区花岗片麻岩中 $\delta^{18}O$ 值低至 $-5\text{‰} \sim -7\text{‰}$ 的锆石采用空气剥蚀技术得到的锆石内部岩浆核 $\delta^{18}O$ 值与未采用空气剥蚀技术得到的整体锆石 $\delta^{18}O$ 值基本一致, 二者 $\delta^{18}O$ 值差别小于 1‰ , 表明这些低 $\delta^{18}O$ 值主要代表锆石内部新元古代岩浆核的氧同位素组成。以上分析表明, 大别—苏鲁地区印支期超高压变质作用对变质岩原岩岩浆锆石 $\delta^{18}O$ 值并没有产生明显的改变。虽然多数样品的单矿物在变质作用过程中发生了氧同位素再平衡现象(见 5.4 章节中的有关讨论), 但样品 04SD06 中的石英—锆石矿物对仍然给出了 $830\text{ }^\circ\text{C}$ 氧同位素温度, 说明该样品中的石英和锆石基本保存了原岩岩浆结晶时的氧同位素平衡状态, 其全岩 $\delta^{18}O$ 值与原岩岩浆 $\delta^{18}O$ 估计值范围也比较一致(表 2)。因此本文认为这些低 $\delta^{18}O$ 值锆石主要反映原岩岩浆锆石的氧同位素组成, 这些锆石是从极度亏损 ^{18}O 的岩浆中直接结晶形成。

威海地区皂埠镇沙龙王村口公路剖面样品与海

滩处样品的距离约 300 m(图 2), 但这两处的花岗片麻岩中锆石 $\delta^{18}O$ 值具有较大的差异。位于沙龙王村海滩附近的 2 个花岗片麻岩样品锆石 $\delta^{18}O$ 值在 $5.24\text{‰} \sim 5.40\text{‰}$ 之间, 显示出氧同位素组成相对比较均一的特点。位于沙龙王村村口公路剖面中的 4 个花岗片麻岩样品(04SD03~04SD06) 锆石 $\delta^{18}O$ 值在 30 m 的局部范围内变化较大, 由 -7.8‰ 变化至约 -1.2‰ , 但是这 4 个样品中的石英、长石和磁铁矿等矿物的 $\delta^{18}O$ 值相对差别却比较小(表 2, 图 9), 而且样品 04SD03、04SD04 和 04SD05 中的石英—锆石矿物对没有处于岩浆结晶温度下的氧同位素平衡状态(表 2, 图 6), 尤其是样品 04SD05 中石英的 $\delta^{18}O$ 值甚至低于锆石的 $\delta^{18}O$ 值, 这表明该处的低 $\delta^{18}O$ 值花岗片麻岩原岩曾经与 $\delta^{18}O$ 值更低的流体发生过亚固相高温热液蚀变。因为锆石具有比石英更高的氧同位素封闭温度, 所以锆石 $\delta^{18}O$ 值基本没有受到改造, 依旧保存了其岩浆结晶时的 $\delta^{18}O$ 值。因此锆石 $\delta^{18}O$ 值的显著变化, 指示低 $\delta^{18}O$ 值原岩岩浆在局部范围内氧同位素组成是不均一的, 这种不均一性可能主要是由于 $\delta^{18}O$ 值变化较大的热液蚀变岩石再经受重熔所致, 反映了热液蚀变岩石由重熔至再结晶成岩的过程可能非常快速, 导致低 $\delta^{18}O$ 值岩浆的氧同位素组成在局部范围内没有达到均一化。但也不能完全排除低 $\delta^{18}O$ 值岩浆在侵位时又与围岩发生局部同化混染的可能性(图 8)。

5.3 高温热液蚀变过程中的流体特征

样品 04SD05 中石英—锆石氧同位素分馏出现倒转现象, 其全岩 $\delta^{18}O$ 值也显著低于原岩岩浆 $\delta^{18}O$

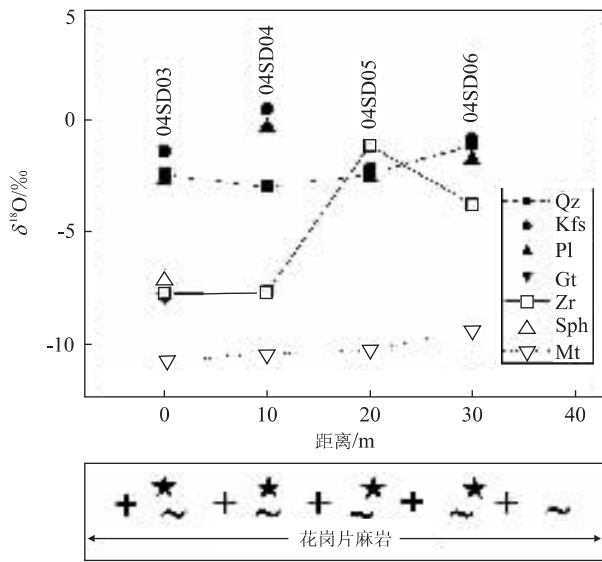


图 9 威海地区皂埠镇花岗片麻岩氧同位素剖面

Fig. 9 Profile for the oxygen isotope compositions of minerals from the granitic gneisses at Zaobuzhen in the Weihai region

估计值(表 2, 图 9), 指示该处的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值花岗片麻岩原岩形成之后又与 $\delta^{18}\text{O}$ 值更低的流体发生了高温热液蚀变, 造成石英、长石和磁铁矿等单矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著降低, 但锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本没有受到影响, 因此高温热液蚀变很可能处于亚固相条件, 即温度低于 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zheng *et al.*, 2004). 04SD05 中石英—磁铁矿处于角闪岩相变质作用条件下的氧同位素平衡状态, 指示该样品发生高温热液蚀变的时间应该是在角闪岩相变质作用之前; 而榴辉岩相变质作用发生于地幔深部, 总体处于流体不活动环境 (Zheng *et al.*, 2003), 地表低 $\delta^{18}\text{O}$ 值流体一般也无法到达此深度 ($\sim 120\text{ km}$), 所以发生亚固相高温热液蚀变的时间应该在大陆板块俯冲之前. 类似的情况在大别造山带北淮阳浅变质带新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值花岗岩中也有报道 (吴元保等, 2004), 说明这一期的热液蚀变作用可能具有一定的区域性质. 由于样品 04SD05 两侧的花岗片麻岩中均没有发生石英—锆石氧同位素分馏倒转现象 (图 9), 因此, 低 $\delta^{18}\text{O}$ 值热液流动方式很可能以沟道式为主, 高温热液蚀变的影响仅局限在几米范围内.

5.4 变质作用过程中的流体特征

已有的研究认为, 大别—苏鲁地区变质岩在印支期超高压变质过程中总体处于地幔深部流体不活动环境, 所以俯冲板块与外部岩石圈地幔没有发生明显的氧同位素交换 (Zheng *et al.*, 2003). 然而在

俯冲板块快速折返初期随着压力的降低, 其自身会释放出一定的内部缓冲流体 (Zheng *et al.*, 1999, 2003). 典型的实例就是在江苏东海青龙山地区, 虽然这些内部流体没有影响变质岩原岩和锆石的氧同位素组成, 却可以引起锆石发生不同程度的变质重结晶或变质增生, 并导致锆石 U-Pb 体系发生不同程度的重置 (Zheng *et al.*, 2004). 与此同时, 受这些内部缓冲流体的影响, 榴辉岩中主要单矿物在达到氧同位素平衡状态的同时, 其全岩 Sm-Nd 和 Rb-Sr 体系也基本完全重置 (Zheng *et al.*, 2002). 另一个典型实例是大别地区黄镇低温榴辉岩, 其原岩为残留的古元古代俯冲玄武质洋壳, 富含水的硬柱石矿物在板块快速折返初期发生减压分解, 同时也释放出一定的内部缓冲流体 (Li *et al.*, 2001, 2004).

本文锆石 CL 结构分析和 U-Pb 定年结果指示, 威海地区皂埠镇花岗片麻岩在超高压变质作用过程中局部可能也存在着一定的内部缓冲流体, 不仅导致部分岩浆锆石发生不同程度的变质重结晶作用, 也导致部分锆石 U-Pb 体系发生不同程度的重置. 在图 9 剖面中, 锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化较大, 表明这种内部缓冲流体对锆石初始氧同位素组成影响不大; 但 4 个样品中石英、长石和磁铁矿等矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差别不大, 因此这些矿物的氧同位素组成有可能受到内部缓冲流体的影响. 但在 4 个石英—锆石矿物对中, 样品 04SD06 仍然给出 $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的氧同位素平衡温度 (表 2, 图 6), 表明这些内部缓冲流体对花岗片麻岩原岩的氧同位素组成影响非常有限, 部分石英仍旧保存了原岩岩浆结晶时的 $\delta^{18}\text{O}$ 值. 样品 04SD03 和 04SD04 只给出了 $465\sim 530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的氧同位素温度, 明显低于 $750\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的花岗岩岩浆温度, 同时石英—磁铁矿矿物对基本处于角闪岩相变质作用条件下的氧同位素平衡状态, 以上特征指示这 2 个样品中的石英与周围其他矿物在变质作用过程中发生了氧同位素交换, 造成石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值在变质作用过程中略有升高.

胶东地块在燕山期有一次强烈的岩浆事件, 这一期岩浆活动的时间分别为 $150\sim 160\text{ Ma}$ 和 $120\sim 130\text{ Ma}$ (Wang *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2003). Ames *et al.* (1996) 曾经在威海地区新元古代花岗片麻岩锆石中获得过 1 个燕山期下交点年龄 ($153\pm 13\text{ Ma}$), 但本文锆石 U-Pb 定年结果没有发现燕山期岩浆活动的年龄信息, 并且这些样品中主要矿物仍旧保存了不同变质条件下的氧同位素平衡

状态(表2,图6),其中石榴石、榍石等矿物在榴辉岩相变质作用过程中基本达到并保存了氧同位素平衡状态,磁铁矿则在角闪岩相变质作用过程中达到并保存了氧同位素平衡状态。在图9剖面中,石英和磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化趋势基本相同。以上特征均指示这些矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在榴辉岩相和角闪岩相变质作用之后基本没有受到外来流体的扰动。因此可以认为,皂埠镇花岗片麻岩基本未受到燕山期岩浆活动的扰动。但长石在亚固相条件下容易受到低温($<400\text{ }^\circ\text{C}$)热液蚀变作用影响,导致其 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著升高,造成这些样品中石英与长石氧同位素分馏值普遍发生倒转现象,因此部分样品中全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于原岩岩浆估计值(表2)的主要原因是由于长石遭受退变质作用所致。

6 结论

威海地区皂埠镇花岗片麻岩中锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低至 -7.8% 左右,对这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究表明:(1)这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石以新元古代岩浆锆石为主,部分锆石在印支期超高压变质作用过程中发生不同程度的变质重结晶作用。(2)低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆锆石表明它们是从新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆中直接结晶形成,锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值的局部变化表明其原岩岩浆的氧同位素组成具有不均一性,指示低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆源区物质曾经在地表与极度亏损 ^{18}O 的大气降水发生过不同程度的高温热液蚀变作用。但部分新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值花岗岩在成岩之后又与低 $\delta^{18}\text{O}$ 值流体发生亚固相高温热液蚀变作用。(3)低 $\delta^{18}\text{O}$ 值花岗片麻岩在印支期板块俯冲和折返过程中基本没有与外部发生显著的氧同位素交换,在退变质作用过程中其自身存在着内部缓冲流体,但这种内部缓冲流体对原岩岩浆锆石的氧同位素组成影响不大。(4)威海皂埠镇地区和东海青龙山地区的花岗片麻岩在锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成等方面基本相同,指示它们应具有相同的原岩性质,并经历了相同的变质作用和水岩相互作用过程。

致谢:SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定得到了北京离子探针中心万渝生和王彦斌研究员的协助,锆石 CL 照像得到了中国地质科学院矿床所周剑雄研究员和陈振宇工程师的协助,野外工作得到了黄浩的协助,氧同位素分析过程中得到了查向平和赵彦冰等人的协助。

References

- Ames, L., Zhou, G. Z., Xiong, B. C., 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15: 472–489.
- 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: 315–331.
- Bacon, C. R., Adami, L. H., Lanphere, M. A., 1989. Direct evidence for the origin of low- $\delta^{18}\text{O}$ silicic magmas: Quenched samples of a magma chamber's partially-fuse granitoid walls, Crater Lake Oregon. *Earth and Planetary Science Letters*, 96: 199–208.
- Baker, J., Matthews, A., Matthey, D., et al., 1997. Fluid-rock interactions during ultra-high pressure metamorphism, Dabie Shan, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 1685–1696.
- Balsley, S. D., Gregory, R. T., 1998. Low- $\delta^{18}\text{O}$ silicic magmas: Why are they so rare. *Earth and Planetary Science Letters*, 162: 123–136.
- Banno, S., Enami, M., Hirajima, T., et al., 2000. Decompression P - T path of coesite eclogite to granulite from Weihai, eastern China. *Lithos*, 52: 97–108.
- Bindeman, I. N., Valley, J. W., 2001. Low- $\delta^{18}\text{O}$ rhyolites from Yellowstone; Magmatic evolution based on analyses of zircons and individual phenocrysts. *Journal of Petrology*, 42(8): 1491–1517.
- Carswell, D. A., Wilson, R. N., Zhai, M. G., 2000. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China. *Lithos*, 52: 121–155.
- Chen, D. G., Deloule, E., Cheng, H., et al., 2003a. Preliminary study of micro-scale zircon oxygen isotopes for Dabie-Sulu metamorphic rocks; Ion probe in situ analyses. *Chinese Science Bulletin*, 48: 1670–1678.
- Chen, J. F., Xie, Z., Li, H. M., et al., 2003b. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochemical Journal*, 37(1): 35–46.
- Compston, W., Williams, I. S., Kirschvink, J. L., 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *Journal of the Geological Society, London*, 149: 171–184.
- Gao, T. S., Chen, J. F., Xie, Z., et al., 2004. Geochemistry of

- Triassic igneous complex at Shidao in the Sulu UHP metamorphic belt, *Acta Petrologica Sinica*, 20(5):1025—1038 (in Chinese with English abstract).
- Gilliam, C. E., Valley, J. W., 1997. Low $\delta^{18}\text{O}$ magma, Isle of Skye, Scotland: Evidence from zircons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61:4975—4981.
- Gong, B., Zheng, Y. F., 2003. A CO_2 -laser technique for oxygen isotope analysis of silicates. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 279—286 (in Chinese with English abstract).
- Hacker, B., Ratschbacher, L., Webb, L., 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161:215—230.
- Hiramatsu, N., Banno, S., Hirajima, T., et al., 1995. Ultrahigh-pressure garnet kherzolite from Chijiadian, Rongcheng County, in the Su-Lu region of eastern China. *The Island Arc*, 4:324—333.
- Jahn, B. M., Cornichet, J., Cong, B. L., et al., 1996. Ultrahigh- ϵ_{Nd} eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. *Chemical Geology*, 127:61—79.
- King, E. M., Valley, J. W., Davis, D. W., et al., 1998. Oxygen isotope ratios of Archean plutonic zircons from granite-greenstone belts of the Superior Province: Indicator of magmatic source. *Precambrian Research*, 92:365—387.
- Li, S. G., Jagoutz, E., Lo, C. H., et al., 1999. Sm/Nd, Rb/Sr, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu belt, Central China: A retrospective view. *International Geology Review*, 41:1114—1124.
- Li, Y. L., Zheng, Y. F., Fu, B., et al., 2001. Oxygen isotope composition of quartz-vein in ultrahigh-pressure eclogite from Dabieshan and implications for transport of high-pressure metamorphic fluid. *Physics and Chemistry of the Earth (Part A)*, 26:695—704.
- Li, X. P., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2004. Low- T eclogite in the Dabie terrane of China: Petrological and isotopic constraints on the fluid activity and radiometric dating. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148:443—470.
- Liu, C. H., Sun, J. G., Zheng, C. Q., 1995. Geochemical features and genesis of the Wendeng adamellite rockbody, eastern Shandong Province. *Jilin Geology*, 14(4):51—58 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., 1998. Geochronology and Sm-Nd isotopic geochemistry of Precambrian crystalline basement in eastern Shandong Province. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 275—283 (in Chinese with English abstract).
- Nakamura, D., Hirajima, T., 2000. Granulite-facies overprinting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks, north-eastern Su-Lu region, eastern China. *Journal of Petrology*, 41(4):563—582.
- Peck, W. H., Valley, J. W., Graham, C. M., 2003. Slow oxygen diffusion rates in zircons from metamorphic rocks. *American Mineralogist*, 88:1003—1014.
- Rowley, D. B., Xue, F., Tucker, R. D., et al., 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 151:191—203.
- Rumble, D., Yui, T. F., 1998. The Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62:3307—3321.
- Rumble, D., Wang, Q. C., Zhang, R. Y., 2000. Stable isotope geochemistry of marbles from the coesite UHP terrains of Dabieshan and Sulu, China. *Lithos*, 52:79—95.
- Rumble, D., Giorgis, D., Ireland, T., et al., 2002. Low $\delta^{18}\text{O}$ zircons, U-Pb dating, and the age of the Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66:2299—2306.
- Song, B., Zhang, Y. H., Wan, Y. S., 2002. Mount making and procedures of the SHRIMP dating. *Geology Reviews*, 48(Suppl.):26—30 (in Chinese with English abstract).
- Song, M. C., Wang, L. M., Wang, L. Z., et al., 1995. Ludong Rongcheng gneiss suite and its origin. *Shandong Geology*, 11(2):32—44 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. G., Hu, K., 1997. Geochemistry and petrogenesis of the Proterozoic granitoids in the East Shandong peninsula, China. *Acta Geoscientia Sinica*, 13(3):439—450 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2004. Zircon U-Pb ages and oxygen isotopes of metamorphic rocks in the eastern part of the Shandong peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20:1039—1062 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, H. P., Sheppard, S. M. F., 1986. Igneous rocks: I. Isotopic case studies of circumpacific magmatism. In: Valley, J. W., Taylor, H. P., O'Neil, J. R., eds., Stable isotopes in high temperature geological process. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 16:227—271.

- Taylor, H. P., 1986. Igneous rocks: II. Isotopic case studies of circumpacific magmatism. In: Valley, J. W., Taylor, H. P., O'Neil, J. R., eds., Stable isotopes in high temperature geological process. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 16: 273—316.
- Valley, J. W., Chiarenzelli, J. R., McLelland, J. M., 1994. Oxygen isotope geochemistry of zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 126: 187—206.
- Valley, J. W., Kinny, P. D., Schulze, D. J., et al., 1998. Zircon metacryst from kimberlite: Oxygen isotope variability among mantle melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133: 1—11.
- Valley, J. W., 2003. Oxygen isotopes in zircon. In: Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O., eds., *Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 343—385.
- Wallis, S., Enami, M., Banno, S., 1999. The Sulu UHP terrane: A review of the petrology and structural geology. *International Geology Review*, 41: 906—920.
- Wang, L. G., Qiu, Y. M., McNaughton, N. J., et al., 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13: 275—287.
- Wang, L. M., Song, B., Wu, H. X., et al., 1994. Protolith age of eclogites in Shandong Province: Zircon U-Pb dating of single grains. *Chinese Science Bulletin*, 39(19): 1788—1791 (in Chinese).
- Wang, L. M., Huang, F., Liu, G. Z., et al., 1995. The basic characteristics of Ludong eclogites. *Shandong Geology*, 11(2): 15—22 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. C., An, Y. H., 1996. Main achievement and progress of the basic geological research over last ten years in eastern Shandong region. *Shandong Geology*, 12(1): 8—23 (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. *European Journal of Mineralogy*, 5: 141—152.
- Watson, E. B., Cherniak, D. J., 1997. Oxygen diffusion in zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 527—544.
- Wei, C. S., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2002. Oxygen and neodymium isotope evidence for recycling of juvenile crust in northeast China. *Geology*, 30: 375—378.
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Gong, B., et al., 2004. Zircon U-Pb ages and oxygen isotope compositions of the Luzhengan magmatic complex in the Beihuaiyang zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1007—1024 (in Chinese with English abstract).
- Wyllie, P. J., 1983. Experimental studies on biotite- and muscovite-granites and some crustal magmatic process. In: Atherton, M. P., Gribble, C. D., eds., *Magmatites, melting and metamorphism*. Shiva Publishing Limited, Cambridge, 12—26.
- Wyllie, P. J., 1995. Experimental petrology of upper-mantle materials, process and products. *Journal of Geodynamics*, 20: 429—468.
- Xu, H. L., Zhang, D. Q., Sun, G. Y., 1997. Characteristics and genesis of Kunyushan granite and its relation with gold deposits in Jiaodong. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 131—143 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Chung, S. L., Wilde, S. A., et al., 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu orogenic belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214: 99—125.
- Yang, J. S., Wooden, J. L., Wu, C. L., et al., 2003. SHRIMP U-Pb dating of coesite-bearing zircon from the ultrahigh-pressure metamorphic rocks, Sulu terrane, East China. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 551—560.
- Ye, K., Xu, P., 1992. Petrogenesis of eclogites and related peridotitic rocks in Datuan area of Rongcheng county, Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 8(1): 27—39 (in Chinese with English abstract).
- Ye, K., Yao, Y. P., Katayama, I., et al., 2000. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: New implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 52: 157—164.
- Yui, T. F., Rumble, D., Chen, C. H., 1995. Unusually low $\delta^{18}\text{O}$ ultra-high-pressure metamorphic rocks from the Sulu terrain, eastern China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2859—2864.
- Yui, T. F., Rumble, D., Chen, C. H., et al., 1997. Stable isotope characteristics of eclogites from the ultrahigh-pressure metamorphic terrain, east-central China. *Chemical Geology*, 137: 135—147.
- Zhai, M. G., Cong, B. L., Guo, J. H., et al., 2000. Sm-Nd geochronology and petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region of China and their geotectonic implication. *Lithos*, 52: 23—33.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Ernst, W. G., 1995. Ultrahigh-pressure metamorphism and decompressional p - T paths

- of eclogites and country rocks from Weihai, eastern China. *The Island Arc*, 4: 293–309.
- Zhang, X. O., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2003. Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong peninsula, China. *Mineralium Deposita*, 38: 141–153.
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2003. Calculation of oxygen isotope fractionation in magmatic rocks. *Chemical Geology*, 193: 59–80.
- Zheng, Y. F., 1991. Calculation of oxygen isotope fractionation in metal oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 2299–2307.
- Zheng, Y. F., 1993a. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 1079–1091.
- Zheng, Y. F., 1993b. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates. *Earth and Planetary Science Letters*, 120: 247–263.
- Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., et al., 1996. Extreme $\delta^{18}\text{O}$ depletion in eclogite from the Su-Lu terrane in East China. *European Journal of Mineralogy*, 8: 317–323.
- Zheng, Y. F., Fu, B., 1998. Estimation of oxygen diffusivity from anion porosity in minerals. *Geochemical Journal*, 32: 71–89.
- Zheng, Y. F., Fu, B., Li, Y. L., et al., 1998. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ultrahigh-pressure eclogites from the Dabie Mountains and the Sulu terrane. *Earth and Planetary Science Letters*, 155: 113–129.
- Zheng, Y. F., Fu, B., Xiao, Y. L., et al., 1999. Hydrogen and oxygen isotope evidence for fluid-rock interactions in the stages of pre- and post-UHP metamorphism in the Dabie Mountains. *Lithos*, 46: 677–693.
- Zheng, Y. F., Fu, B., Li, Y. L., et al., 2001. Oxygen isotope composition of granulites from Dabieshan in eastern China and its implications for geodynamics of Yangtze plate subduction. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 673–684.
- Zheng, Y. F., Wang, Z. R., Li, S. G., et al., 2002. Oxygen isotope equilibrium between eclogite minerals and its constraints on mineral Sm-Nd chronometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 625–634.
- 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: 105–161.
- Zheng, Y. F., Wu, Y. B., Chen, F. K., et al., 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4145–4165.

附中中文参考文献

- 高天山, 陈江峰, 谢智, 等, 2004. 苏鲁超高压变质带中三叠纪石岛杂岩体的地球化学研究. *岩石学报*, 20(5): 1025–1038.
- 龚冰, 郑永飞, 2003. 硅酸盐矿物氧同位素组成的激光分析. *地质前缘*, 10(2): 279–286.
- 刘春华, 孙景贵, 郑常青, 1995. 胶东文登岩体——二长花岗岩质地球化学特征及成因探讨. *吉林地质*, 14(4): 51–58.
- 陆松年, 1998. 鲁东前寒武纪结晶基底的年代学及 Sm-Nd 同位素地球化学. *地质前缘*, 5(4): 275–283.
- 山东省地矿局区调队四分队, 1992. 威海幅和文登幅 1: 20 万区域地质调查说明书, 1–96.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26–30.
- 宋明春, 王来明, 王兰中, 等, 1995. 鲁东荣城片麻岩套及其成因. *山东地质*, 11(2): 32–44.
- 孙景贵, 胡克, 1997. 胶东东部地区元古宙花岗岩类的地球化学及岩石成因. *岩石学报*, 13(3): 439–450.
- 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 等, 2004. 胶东地块东部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究. *岩石学报*, 20: 1039–1062.
- 王来明, 宋彪, 吴洪祥, 等, 1994. 山东榴辉岩的生成时代: 单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄. *科学通报*, 39(19): 1788–1791.
- 王来明, 黄峰, 刘贵章, 等, 1995. 鲁东榴辉岩基本特征. *山东地质*, 11(2): 15–22.
- 王沛成, 安郁宏, 1996. 鲁东地区十多年来基础地质研究的主要成果和进展. *山东地质*, 12(1): 8–23.
- 吴元保, 郑永飞, 龚冰, 等, 2004. 北淮阳庐镇关岩浆岩锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成. *岩石学报*, 20(5): 1007–1024.
- 徐洪林, 张德全, 孙桂英, 1997. 胶东昆崙山花岗岩的特征、成因及其与金矿的关系. *岩石矿物杂志*, 16(2): 131–143.
- 叶凯, 徐平, 1992. 山东荣成大瞳榴辉岩成因岩石学研究. *岩石学报*, 8(1): 27–39.