苏鲁造山带西北缘五莲花岗岩中锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

周建波^{①②} 郑永飞^{②*} 吴元保^②

(①吉林大学地球科学学院, 长春 130026; ②中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026.

* 联系人, E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn)

摘要 苏鲁造山带西北缘五莲杂岩带中产有绿片岩相浅变质杂岩组合. 对其中 3 个代表性花岗岩体进行了锆石 U-Pb 年龄测定, 得到的谐和年龄分别为 672 ± 4 , 742 ± 9 和 747 ± 14 Ma, 证明这些花岗岩为新元古代岩浆活动的产物. 由此可见, 这些五莲花岗岩是新元古代时期侵位于扬子板块北缘的侵入岩, 与大别山北麓的卢镇关岩浆杂岩相对应, 都是三叠纪扬子板块俯冲过程中刮削下来的构造岩片, 隶属于大陆板块俯冲构造加积楔的一部分. 新元古代岩浆岩在五莲地区的产出说明, 苏鲁造山带的板块缝合带位于五莲杂岩带的北侧, 因此其位置在五莲断裂以北.

关键词 锆石 U-Pb 定年 加积楔 浅变质岩 花岗岩 苏鲁造山带

苏鲁造山带位于秦岭-大别造山带的东部, 以发育由花岗质片麻岩-榴辉岩-大理岩杂岩组成的超高压变质岩为特征, 是扬子板块与华北板块之间三叠纪时期俯冲-碰撞的产物^[1~4]. 在超高压变质带北部的胶南地区五莲断裂以北, 发育一条宽约 10~14 km 的五莲杂岩带, 产有绿片岩相变质的岩浆杂岩和变沉积岩(图 1). 从大地构造格局对比分析, 五莲杂岩带应与大别造山带北缘的北淮阳构造带相对应^[5]. 然而, 对该杂岩带及其东向延伸部分(五莲-威海断裂以北的变质杂岩)的大地构造归属存在重大分歧^[3,4,6~12]. 一般认为, 五莲-威海断裂以北胶东地区的蓬莱群变质杂岩隶属华北板块南缘, 因此五莲-威海断裂对应于扬子板块与华北板块之间的缝合带^[6~10]. 但是, Faure 等人^[11,12]根据蓬莱群变质岩与北大别和北淮阳变质岩之间的对比, 认为在苏鲁造山带东部扬子板块与华北板块之间的缝合带应在蓬莱群变质杂岩以北. 由于板块碰撞缝合带的位置是造山带研究的重要内容, 因此上述争论引起了国内外地质学家的广泛关注. 从构造地质格局和地理位置上来看, 五莲地区的构造岩石单元是对比胶东与大别造山带之间的纽带, 因此对深入探讨整个造山带区域构造格局与演化具有关键意义. 但相对于超高压变质带及大别地区的北淮阳构造带, 前人对五莲杂岩带的研究还较少, 直到目前为止尚未在文献中发现有关五莲杂岩同位素年代学研究的详细报道. 为此, 本文采用单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法对五莲杂岩中部分花

岗岩进行了年龄测定, 以进一步确定这些花岗岩体的形成时代及构造背景.

1 地质背景

五莲杂岩带的研究得益于前人对五莲群研究工作的资料积累. 20 世纪 70 年代末期山东地矿局区调队在胶南地区进行地质填图时, 把五莲周围一套岩性和构造复杂、时代不甚明确、内外接触关系不清楚的变质地层归并一起, 称为五莲群, 时代定为元古代, 并具体划分出海眼口组和坤山组.

我们自 1991 年以来在 1:5 万五莲等八幅地质填图和专题调研的基础上, 发现原五莲群实际上包括了以下几种岩石组合: (1) 主体为片麻状花岗岩组合, 相当于原被定义为五莲群的下部层位(海眼口组), 经详细研究表明均为各种变形的花岗岩侵入体, 约占五莲杂岩总出露面积的 50%, 也是本次同位素定年的主要对象; (2) 变质中性-基性岩组合, 相当于原五莲群的中部层位, 岩性以斜长角闪岩为主, 夹有少量大理岩透镜体, 采自五莲海眼口的斜长角闪岩样品经全岩 Sm-Nd 法同位素分析, 得到其等时线年龄为 1663 Ma(未发表数据), 反映这些岩石形成于中元古代; (3) 石英岩-碳质板岩-千枚岩-大理岩组合, 该组合岩石相当于原五莲群的顶部地层(坤山组), 以低绿片岩相变质为主, 为典型的浅变质沉积岩系. 赵达等人^[13]曾对该组地层进行微古植物化石的采样和鉴定, 发现大量的藻类化石如 *Ceratophyton vernicosum*

图 1 苏鲁造山带地质构造图

(光亮角形藻)、*Teophipolia lacelata* (撕裂杰菲波藻)、*Lophosphaeridium* sp. (瘤面球藻, 未定种)及 *Preasolenopore* sp. (前管扎藻, 未定种)等, 这些微古植物化石代表这些岩石形成于震旦纪~早寒武纪, 与扬子板块北缘震旦系陡山沱组化石可以对比, 代表了扬子板块北缘的震旦纪前后浅海相稳定环境下的沉积, 可与大别地区北淮阳构造带中的佛子岭群对比. 岩石学上, 五莲杂岩带中的片麻状花岗岩组合和变质中性-基性岩组合可与北淮阳构造带中的卢镇关岩浆杂岩相对比.

此外, 郭振一等人^[14]曾在五莲杂岩带北侧黄华店莱阳群灰岩砾石中采集到扬子型石炭-二叠系荇类及有孔虫类化石(*Schubertella lata* Lee et Chen, *Palaeotextularia* sp., *Climacamina* sp., *Tetrataxis* sp., *Eotuberitina* sp.), 这些砾石的母岩明显来源于五莲杂岩. 这也显示五莲杂岩带含有扬子板块的构造岩

石组合特征, 与大别-苏鲁超高压带内部和北淮阳构造带内的浅变质岩一致^[15,16]. 显然, 五莲杂岩带包括了不同时代、不同变质程度和不同属性的岩石, 且发育强烈的动力变质, 区域上呈同斜褶皱-叠瓦状冲断层-构造混杂岩的组合形式出露, 具有板块俯冲过程中被刮削下来的岩石组合-加积楔杂岩的典型特征^[16], 因此与大别地区的佛子岭群一样, 隶属扬子板块北缘新元古代~古生代沉积岩及其大陆基底.

2 样品和同位素分析结果

样品主要采自五莲杂岩带中的片麻状花岗岩中(采样点见图 1), 其中样品 WTW1 采自五莲西部的桑园、WTW2 采自五莲县城附近大双墩的片麻状花岗岩中, HTW3 采自五莲断裂带南部围场村的户部岭. 各主要岩石样品特征如下:

样品 WTW1: 岩性为片麻状中粗粒黑云角闪二

长岩,中粗粒柱状变晶结构,片麻状构造.矿物组成为钾长石(47%) + 斜长石(30%) + 角闪石(15%) + 黑云母(5%) + 石英(2%),可见少量的单斜辉石.钾长石为条纹长石,斜长石多发育密集的聚片双晶,部分有弱的绢云母化.样品锆石皆为浅紫色,自形晶,柱状锆石,透明,纯净,表面无熔蚀磨圆现象,反映岩浆成因特征.

样品 WTW2: 岩性为片麻状中粒黑云二长花岗岩,中粒花岗变晶结构,弱片麻状构造,主要矿物组成为钾长石(34%) + 斜长石(25%) + 石英(35%) + 黑云母(8%),其中钾长石大多为条纹长石,斜长石聚片双晶发育.样品中锆石形态相似,皆为自形晶,浅紫色,柱状锆石,多为透明,纯净,表面无熔蚀磨圆现象,反映岩浆成因特征.

样品 HTW3: 岩性为片麻状细粒钾长花岗岩,鳞片粒状变晶结构,片麻状构造.主要矿物组成为钾长石(50%) + 斜长石(5%) + 石英(35%) + 云母(5~10%),有时可见少量白云母、绿泥石、绿帘石等,其中钾长石大多发育较好的格子状双晶,为微斜长石;白云母大多为黑云母转化而来.样品锆石主要以自形晶为主,浅紫色,柱状,透明,纯净,反映岩浆成因特征;部分锆石表面有熔蚀磨圆现象,可能为残留锆石.这些岩石样品均保留了典型的岩浆岩结晶结构,应用锆石 U-Pb 定年技术是获得这些岩浆岩准确侵位年龄

的最佳选择.

全部样品由天津地质矿产研究所同位素地质研究室挑选单颗粒锆石单矿物并进行 U-Pb 年龄测定.化学分离采用改进的 Krogh^[17]的流程,质谱计为 VG-354,其中 ²⁰⁶Pb 和 ²⁰⁴Pb 结果已对试验空白和稀释剂做过校正,U-Pb 同位素分析结果见表 1,分析流程中 Pb 的本底为 50 pg, U 的本底为 2 pg.应用 ISOPLLOT 软件进行处理得出 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和图(图 2).多数样品的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值在 200 以上,甚至接近 6000,表明这些数据结果受普通 Pb 影响较小^[18],年龄结果可靠.

从样品 WTW1 挑选出 3 颗锆石,其 U-Pb 同位素数据点位于谐和曲线上,同位素年龄为 742 ± 9 Ma,应为其岩浆侵位时代.样品 WTW2 挑选出 3 颗锆石,其 U-Pb 同位素数据点位于谐和曲线上,同位素年龄为 747 ± 14 Ma,同样代表了该岩体的侵位年龄.HTW3 共挑选出 6 颗锆石,其中 4~6 数据点靠近谐和线上,而 1~3 数据点分布在不一致线上;不一致线与谐和线的上交点年龄为 2935 ± 136 Ma,下交点年龄为 672 ± 4 Ma,显然上交点年龄代表了花岗岩中碎屑锆石的年龄,下交点年龄代表花岗岩浆侵位时代.五莲地区的锆石 U-Pb 同位素年代学研究表明,五莲杂岩的花岗岩主体年龄主要位于 U-Pb 谐和线上,反映这

表 1 五莲杂岩锆石 U-Pb 同位素组成分析结果

样品情况		浓度		普通 Pb /ng	同位素原子比率					表面年龄值/Ma			
点号	锆石特征	质量 /μg	U /μg · g ⁻¹		Pb /μg · g ⁻¹	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
样品 WTW1													
1	浅紫红色短柱状	30	248	47	0.2	160	0.2697	0.1197	1.052	0.0638	792	730	734
2	浅紫红色长柱状	40	320	44	0.0089	6400	0.241	0.1219	1.077	0.0641	742	742	744
3	浅紫红色透明长柱状	30	592	93	0.13	506	0.2712	0.1228	1.088	0.0642	747	747	750
样品 WTW2													
1	浅紫红色短柱状	15	413	54	0.0059	5048	0.1999	0.1186	1.054	0.06449	722	731	758
2	浅紫红色长柱状	15	699	90	0.0052	10573	0.1442	0.1227	1.072	0.06336	746	740	720
3	浅紫红色透明长柱状	15	377	50	0.0052	4641	0.1584	0.1253	1.108	0.06418	761	757	748
样品 HTW3													
1	浅黄色短柱状	10	272	74	0.071	298	0.1026	0.2148	4.499	0.152	1254	1731	2368
2	无色透明短柱状	10	210	64	0.099	157	0.1042	0.2069	4.199	0.1472	1212	1674	2313
3	浅紫色短柱状	10	441	95	0.053	485	0.1057	0.1819	3.302	0.1317	1007	1482	2120
4	无色透明细长柱状	20	249	35	0.005	496	0.2497	0.1099	0.9444	0.06227	673	675	683
5	无色透明长柱状	20	232	38	0.081	280	0.3459	0.1137	0.9878	0.06299	694	698	708
6	浅紫色长柱状	20	316	43	0.0047	5325	0.343	0.1126	0.9714	0.06259	688	689	695

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-22-1745>

图 2 五莲杂岩锆石 U-Pb 同位素年龄谱和图
些岩石的成岩年龄在 672~747 Ma 之间。

3 讨论

五莲杂岩带中片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 同位素定年结果为 672~747 Ma, 显示其为新元古代岩浆活动的产物. 这不仅与大别地区北淮阳构造带内卢镇关片麻状花岗岩的侵位年龄 665~744 Ma^[19,20]一致, 而且与大别-苏鲁超高压带内部港河浅变质火山岩的原岩时代 745~802 Ma 大致相同^[21]. 同时, 对大别-苏鲁造山带大面积区域高压超高压变质岩(榴辉岩和花

岗质片麻岩)的锆石 U-Pb 定年, 其岩浆岩原岩的侵位年龄主要为新元古代(700~800 Ma)^[4,20,22~27]. 结合五莲杂岩带中片麻状花岗岩组合和变质中性-基性岩组合与北淮阳构造带中卢镇观岩浆杂岩在岩石学上的可对比性, 可以认为这些岩石同属扬子板块北缘的陆壳基底岩石, 只是在板块俯冲过程中遭受的变质程度存在重大差异. Hacker 等人^[19]曾对卢镇关杂岩中的角闪石进行 Ar-Ar 定年, 得到两个精确度较好的坪年龄(约 750 Ma), 说明这些杂岩自新元古代之后所遭受的变质反应温度都低于角闪石的 Ar-Ar 封闭温度(<500℃). 五莲杂岩、卢镇关杂岩和超高压带内部浅变质岩(例如苏鲁的石桥、大别的港河等)等均均以低绿片岩相变质为主^[15,16], 但是同位素年龄也显示出三叠纪变质热事件的记录, 显然这些岩石只是没有被俯冲到地幔深度发生超高压变质而已.

在俯冲板块边界, 常发育有板块俯冲过程中被刮削下来的沉积物及其下伏岩石构造叠置而成的楔形体, 称为构造加积楔(accretionary wedge). 这一构造单元不仅广泛产出在以大洋板块俯冲形成的造山带内, 在大陆板块俯冲过程中也同样存在^[16]. 大别-苏鲁造山带为三叠纪时期扬子板块向北俯冲到华北板块之下发生超高压变质并折返出露之后所形成的大陆俯冲-碰撞造山带. 在超高压变质带的北缘和内部产有一系列浅变质沉积岩和岩浆岩, 主体变质程度为绿片岩相, 动力变质变形特征显著. 对这些浅变质岩的化石组合、岩石组合和变质时代的综合地质地球化学研究表明^[15,16], 这些岩石是扬子板块北缘的古生代陆缘沉积物及其下伏的前寒武纪基底, 与超高压变质岩的原岩在岩石组合和形成时代上具有一定的相似性, 只是变质程度上存在显著差异. 显然, 这些浅变质岩是三叠纪扬子板块俯冲过程中被仰冲的华北板块所刮削下来的构造单元, 其形成与就位机制可与大洋板块俯冲过程中形成的加积楔的相对应, 为大陆板块俯冲过程中形成的构造加积楔.

目前, 对大别地区内部港河浅变质火山岩是否经过板块俯冲至地幔深度的超高压变质作用尚有争议, 总体上有“外来”与“原地”两种观点. 一方面, 根据其浅变质特点和原生火山岩结构和层序的保存, 认为没有经过超高压变质^[15,21,28,29], 因此是没有俯冲下去的构造单元^[16]. 另一方面, 在这种浅变质火山岩中发现有穿插在其中的含柯石英榴辉岩墙(脉)^[30], 从而认为这些火山岩与其周围的超高压变质岩一样

也俯冲到了地幔深部,只是变质程度不同而已^[31,32],类似于在苏鲁地体中部青岛仰口的变花岗岩^[33]和变辉长岩^[34].如果这些火山岩的确随大陆板块俯冲到了 100 km 以上的地幔深度而又没有发生超高压变质的话,要求俯冲进入地幔的大陆板块在地幔深部居留时间很短,因此与前人根据榴辉岩氧同位素研究提出的大陆板块俯冲和折返过程都很快、超高压变质持续时间很短的“油炸冰淇淋模型”^[35,36]是一致的.但是相对于结晶的侵入岩来说,火山岩为隐晶质,因其颗粒极为细小而非常易于重结晶.如果这些火山岩与其中穿插的基性岩墙和周围的侵入岩一起随大陆板块俯冲进入地幔深度,在经受 700~900℃和>3.2 GPa 条件的超高压变质作用以后,基性岩墙和侵入岩已经变质成为含柯石英榴辉岩,而火山岩只是受到绿片岩相浅变质,仍然保留其原生火山岩结构和层序,这似乎不太可能.因此,我们认为:(1) 港河火山岩及其附近碧溪岭的变形花岗岩与造山带北麓的卢镇关杂岩和五莲杂岩一样,是没有被俯冲到地幔深度的岩石单元;(2) 超高压变质带内部的浅变质岩隶属扬子板块俯冲过程中被刮削下来的盖层,类似于大陆板块俯冲-碰撞过程中形成的薄皮构造单元^[37];(3) 与浅变质岩毗邻的一套强烈变形和构造重结晶的糜棱岩^[38]为超高压岩片折返(构造侵入)过程中的摩擦破碎带;(4) 穿插在浅变质火山岩中的含柯石英榴辉岩墙^[30]则可能是板块折返过程中挤出的塑性榴辉岩脉体.

4 结论

本文对五莲花岗杂岩的锆石 U-Pb 同位素年代学研究表明,这些浅变质花岗岩的侵位年龄是 672~747 Ma.显然,它们是扬子板块北缘的新元古代侵入体,在三叠纪大陆板块俯冲过程中被刮削下来,呈构造混杂岩形式堆积于俯冲板块的前缘、板块碰撞缝合带的附近.因此,五莲杂岩带为扬子大陆板块俯冲过程中被刮削下来的构造加积杂岩,其北缘对应于扬子板块与华北板块之间的缝合线,而其南侧的五莲断裂可能为板块折返过程中形成的结合面.这一结论不仅有助于进一步揭示大别-苏鲁造山带内部和北缘浅变质岩形成的地球动力学机制,而且可以根据浅变质加积楔的构造定位确定扬子板块与华北板块之间的缝合线位置.如果五莲-威海断裂具有相同构造

属性,则在苏鲁造山带扬子板块与华北板块之间的缝合带应在五莲-蓬莱群杂岩以北.由于苏鲁地区五莲杂岩与大别地区北淮阳构造带内卢镇关杂岩在岩石类型和同位素年代学上的可对比性,两者均为扬子板块北缘新元古代岩浆活动的产物,因此发育于五莲杂岩带南侧的五莲-威海断裂可能与北淮阳带南侧的晓天-磨子潭断裂相对应,两者均不具有板块碰撞缝合线意义.大别地区北淮阳构造带北缘对应于扬子板块与华北板块之间的缝合线,而其南侧的晓天-磨子潭断裂同样可能为板块折返过程中形成的结合面.

致谢 野外工作得到吉林大学胡克教授、姜琦副教授等的协助,同位素年龄测定得到了天津地质矿产研究所同位素地质研究室李惠民研究员等的支持,论文承蒙高山教授和江来利高级工程师审阅并提出宝贵意见,谨致谢忱.本工作受中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-107)和国家自然科学基金(批准号:40033010,40272100)资助.

参 考 文 献

- 1 Okay A I, Xu S -T, Sengor A M C. Coesite from the Dabieshan eclogites, Central China. *Eur J Mineral*, 1989, 1: 595~598
- 2 Xu S T, Okay A I, Ji S Y, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 1992, 256: 80~82
- 3 Liou J G, Zhang R -Y, Eide E A, et al. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China. In: Harrison M T, Yin A, eds. *The Tectonics of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 300~344
- 4 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 215~230
- 5 徐嘉炜. 试论郯城-庐江断裂的平移及其地质找矿意义. *地质矿产研究*, 1978, (5): 1~30
- 6 王清晨, 从柏林. 大别山超高压变质带的大地构造框架. *岩石学报*, 1998, 14(4): 481~492
- 7 从柏林, 王清晨. 大别山-苏鲁超高压变质带研究的最新进展. *科学通报*, 1999, 44(11): 1127~1141
- 8 索书田, 钟增球, 游振东. 大别-苏鲁构造带三叠纪碰撞缝合线的位置. *地球科学*, 2000, 25(2): 111~116
- 9 Zhai M -G, Cong B -L, Guo J -H, et al. Sm-Nd geochronology and petrology of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region of China and their geotectonic implication. *Lithos*, 2000, 52: 23~33
- 10 Zhai M -G. Where is the north China-South China block boundary in eastern China? *Comment. Geology*, 2002, 30(7): 667
- 11 Faure M, Lin W, Breton N L. Where is the north China-South China block boundary in eastern China? *Geology*, 2001, 29(2): 119~122
- 12 Faure M, Breton N L, Lin W, et al. Where is the north China-South China block boundary in eastern China? *Reply*. *Geology*, 2002, 30(7): 667

- Geology, 2002, 30(7): 668
- 13 赵达, 程立人, 刘茂修. 胶南地区五莲群中管孔藻类的发现及其意义. 中国区域地质, 1995, 14(4): 379~384
- 14 郭振一, 孙秀珠. 胶莱拗陷南缘晚侏罗世鲕状灰岩砾石中有孔虫、蠕化石的发现及其大地构造意义. 地质论评, 1985, 31(2): 179~182
- 15 周建波, 郑永飞, 李龙, 等. 大别-苏鲁超高压变质带内部的浅变质岩. 岩石学报, 2001, 17(1): 39~48
- 16 周建波, 郑永飞, 李龙, 等. 扬子大陆板块俯冲的构造加积楔. 地质学报, 2001, 75(3): 338~352
- 17 Krogh T. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 37(3): 485~494
- 18 Zheng Y -F. The three-dimensional U-Pb method: Generalized models and implications for U-Pb two-stage sysematics. *Chem Geol*, 1992, 100: 3~18
- 19 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. *J Geophys Res*, 2000, B105: 13339~13364
- 20 马文璞, 王关玉, 王果胜. 佛子岭岩群中的晋宁期深成岩带及其构造含意. 地质论评, 2001, 47(5): 476~482
- 21 董树文, 王小凤, 黄德志. 大别山超高压变质带浅变质岩片的发现及意义. 科学通报, 1996, 41(9): 815~820
- 22 Ames L, Zhou G, Xiong B. Geochronology and geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 1996, 15: 472~489
- 23 Rowley D B, Xue F, Tucker R D, et al. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 151: 191~203
- 24 陈道公, Isachsen C, 支霞臣, 等. 安徽潜山片麻岩锆石 U-Pb 年龄. 科学通报, 2000, 45(2): 214~217
- 25 谢智, 陈江峰, 张巽, 等. 大别造山带北部石竹河片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 2001, 17(1): 139 ~ 144
- 26 徐惠芬, 杨天南, 刘福来, 等. 苏鲁高压-超高压变质带南部花岗片麻岩-花岗岩的多时代演化. 地质学报, 2001, 75(3): 371~378
- 27 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 大别山东部花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄. 地质科学, 2002, 37(2): 165~173
- 28 汤加富, 钱存超, 高天山. 大别山区榴辉岩带中浅变质火山-碎屑岩组合的发现及其地质意义. 安徽地质, 1995, 5(2): 29~36
- 29 钱存超. 大别山榴辉岩带中浅变质火山-碎屑岩特征及其构造背景. 安徽地质, 1996, 6(2): 15~20
- 30 高天山, 汤加富, 周存亭, 等. 大别山区低绿片岩相火山碎屑岩中榴辉岩脉的发现. 科学通报, 1997, 42(16): 1758~1761
- 31 Oberhaensli R, Martinotti G, Schmid R, et al. Preservation of primary volcanic textures in the ultrahigh-pressure terrain of Dabie Shan. *Geology*, 2002, 30: 699~702
- 32 Dong S -W, Oberhaensli R, Schmidt R, et al. Occurrence of metastable rocks in deeply subducted continental crust from the Dabie Mountains, central China. *Episodes*, 2002, 25: 84~89
- 33 Wallis S R, Ishiwatari A, Hirajima T, et al. Occurrence and field relationships of ultrahigh-pressure metagranitoid and coesite eclogite in the Su-Lu terrane, eastern China. *J Geol Soc London*, 1997, 154: 45~54
- 34 Zhang R Y, Liou J G. Partial transformation of gabbro to coesite-bearing eclogite from Yangkou, the Sulu terrane, eastern China. *J Metamor Geol*, 1997, 15: 183~202
- 35 Zheng Y -F, Fu B, Li Y -L, et al. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ultrahigh pressure eclogites from the Dabie Mountains and the Sulu terrane. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 155: 113~129
- 36 Zheng Y -F, Fu B, Xiao Y -L, et al. Hydrogen and oxygen isotope evidence for fluid-rock interactions in the stages of pre- and post-UHP metamorphism in the Dabie Mountains. *Lithos*, 1999, 46: 677~693
- 37 Oxburgh E R. Flake tectonics and continental collision. *Nature*, 1972, 239: 202~204
- 38 翟明国, 江来利, 王清晨, 等. 关于在大别山超高压带内发现浅变质岩片的讨论. 科学通报, 1999, 44(14): 1560 ~ 1568

(2002-08-02 收稿, 2002-09-04 收修改稿)