

大别山碧溪岭地区超高压变质岩构造分析

索书田^{1,2}, 钟增球², 周汉文², 游振东²

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京, 100083 2. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉, 430074)

摘要: 大比例尺(1:10 000)构造制图及构造分析表明, 碧溪岭地区超高压变质岩含有丰富的构造演化历史记录。同碰撞或挤压组构只保留于榴辉岩及其它超高压变质岩透镜体内部, 表现为高角度网络状超高压剪切带与弱应变透镜体域规律组合格式。前者由面理或糜棱岩化榴辉岩组成, 后者由块状榴辉岩及石榴橄榄岩组成。碰撞期后伸展构造表现为区域性的假单斜状, 内部呈低缓角度的网络状强应变带及所环绕的透镜状弱应变域组合格式, 强应变带的岩石为由榴辉岩退变成的角闪岩相高压片麻岩及部分熔融形成的含榴花岗岩, 透镜状弱应变域的岩石为弱角闪相改造的榴辉岩及石榴橄榄岩。不同尺度上同碰撞或挤压组构及碰撞期后伸展组构所显示的这种残斑-基质流变学结构样式, 虽然与先期原岩成分、结构、流变学的不均一性有关, 但主要是多期递进应变分解作用的结果, 支持榴辉岩“原地”成因模式。依据构造学证据和可利用的岩石学及同位素年代学资料, 分析了超高压变质岩的形成及折返过程, 指出碧溪岭地区超高压变质岩是在 245 ~ 210 Ma 形成的, 碰撞期后伸展作用主要发生在 200 ~ 170 Ma。在超高压变质岩向地壳表层折返过程中, 张扭作用可能有重要功能, 不支持碧溪岭地区遭受过多期超高压变质作用的推论。

关键词: 大别—苏鲁超高压变质带, 碧溪岭区, 榴辉岩, 同碰撞构造, 应变分解, 张扭构造

中图分类号: P588.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2001)02-0385-10

10 多年来, 在国内外地质学者研究大别—苏鲁超高压及高压变质带的热潮中, 不少学者还专门对大别山东部碧溪岭超高压(UHP)变质岩体进行了较深入的岩石学、矿物学、变质作用及 p - T - t 历史^[19]以及同位素示踪和年代学^[1020]的研究工作。这是由于碧溪岭超高压变质岩体是大别地区最大的一个含柯石英的榴辉岩-镁铁质-超镁铁质杂岩体^[6, 12], 且出露较好, 便于观察、样品采集和分析。但是, 由于以往的构造学研究比较薄弱, 至今涉及超高压变质岩形成和折返的一些最基本的地质问题, 诸如榴辉岩及石榴橄榄岩体的规模、空间分布及几何配置关系, 榴辉岩及镁铁质-超镁铁质岩体内部与围岩中的构造及组构特征等, 还没有可以借鉴和利用的论述。因之, 所做的有关同位素年龄的地质意义解释及动

力学模拟, 一般都还缺乏扎实的构造学资料支撑。近期, 我们运用流变学方法及构造分析技术, 在碧溪岭地区进行了构造学研究和大比例尺(1:10 000)构造制图。研究工作过程中, 充分利用各种岩相学及构造学标志, 在准确判别各种面状及线状组构物理意义的基础上, 分别建立了同碰撞(挤压)及碰撞期后(伸展)构造变形样式。本文目的就是描述和分析这些在不同的变质和构造背景下的变形记录, 讨论它们所代表的变形体制, 强调应变分解(strain partitioning)^[21]在大陆深俯冲和超高压变质岩构造演化中的重要作用, 为窥视大别—苏鲁超高压-高压变质带的形成及折返动力学过程提供一个窗口。

1 地质背景

大别—苏鲁造山带是已知全世界 10 多个超高压变质带中规模最大、出露较好和研究程度较高的碰撞造山带之一^[22]。虽然现存在的争论问题颇多, 但对其形成的构造背景, 国内外学者则已趋于一致

收稿日期: 2000-12-28, 修订日期: 2001-02-10

基金项目: 国家重大基础发展项目(G1999075506); 国家自然科学基金资助项目(49972067)

作者简介: 索书田(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 构造地质学专业。长期从事构造地质学、构造分析和岩石圈流变学的教学和科研工作, 近年来主要从事超高压变质带及大陆深俯冲的构造研究工作。

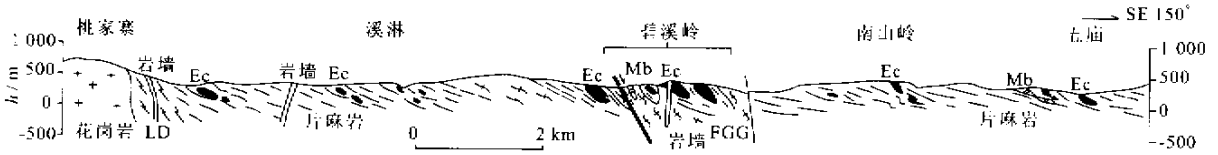


图 1 穿过碧溪岭区的北西—南东向地质剖面

Fig.1 NW - SE cross-section from Taojiazhai through the lower detachment zone (LD) and the Bixiling

area to Wumiao, showing structural and rock association features for the UHP unit

LD—下拆离带 ;Ec—榴辉岩体 ;FGG—面理化含石榴石花岗岩 ;Mb—大理岩

的认识,即把这一巨型的超高压变质带解释为印支期中朝与扬子克拉通会聚和碰撞的结果,而且在造山带尺度上,扬子克拉通北缘大陆壳曾向北深俯冲于中朝克拉通之下达 100 多 km 的地幔深处^[23,24]。由于复杂的深俯冲、碰撞及抬升构造演化过程中应变分解作用的影响,现今观察到的区域构造型式,主要代表印支碰撞期后(200170 Ma)伸展构造的记录^[25,27],其总的构造几何学特点是类似于北美科迪勒拉型变质核杂岩和多层伸展拆离带的发育。在大别山地区 A 个地壳尺度的低缓角度的伸展拆离带将大别地块分成 5 个构造岩石单位,由下而上为变质核杂岩单位、超高压单位、高压单位、绿帘-蓝片岩单位及沉积盖层单位。这些单位及伸展拆离带在垂向上叠置,平面上以湖北省罗田为中心呈同心状展布,几何形态构成一个大型穹窿状,故曾称之为罗田穹窿^[28]。碧溪岭地区就位于该穹窿的南东翼部,岳西县南西 30 km。出露的岩石组合属于超高压构造岩石单位,在下拆离带(LD)的上盘(图 1),岩石学及构造学特点都具有代表性。

2 主要的岩石组合和野外关系

碧溪岭地区详细的构造制图及野外资料如图 2 所示。除了晚中生代岩墙(包括各种煌斑岩、花岗斑岩及正长斑岩)之外,该区出露的岩石主要有下列组合:

(1)榴辉岩:多呈不同大小的透镜体、扁豆体和团块。据矿物组合及岩石结构构造特点,大体可分为两种类型:其一为块状榴辉岩,其二为面理化榴辉岩。前者大体相当于 Zhang 等^[6]称作的富金红石榴辉岩及程裕淇等^[20]称作的深色榴辉岩。峰期变质矿物组合为石榴石 + 绿辉石 + 金红石 ± 柯石英(假象),其中金红石含量一般达 3%~5%,有时高达 7.5%^[20]。后者与程裕淇等^[20]宏观上称作的浅色

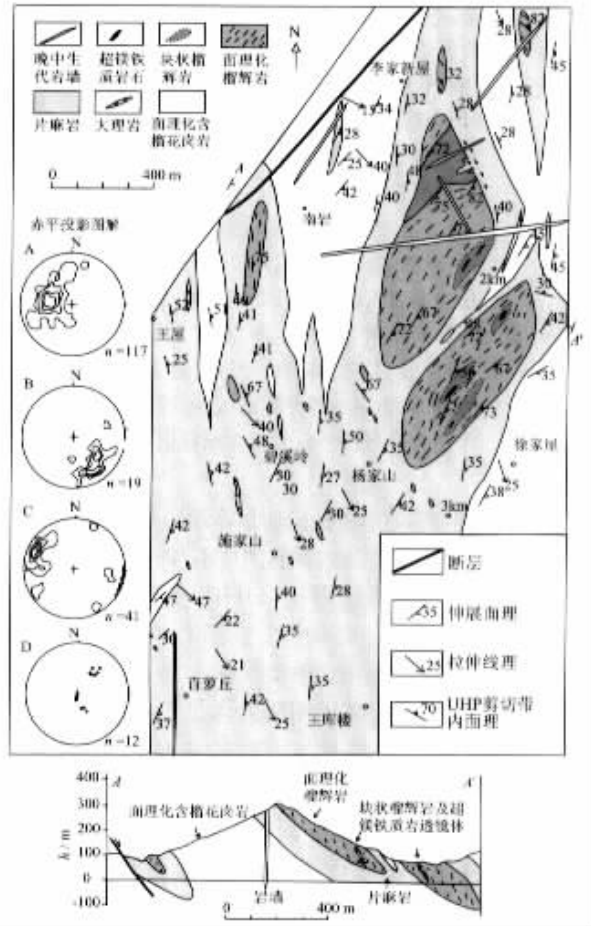


图 2 安徽省碧溪岭区构造图及 A—A' 横剖面图

Fig.2 Structural sketch map and cross section A - A' of the Bixiling area Anhui Province

赤平投影图(等面积下半球投影):A—伸展面理极点($n = 117$),等值线为百分之一面积内 0.9% ~ 4.3% ~ 9.0% ~ 17.1%;B—角闪岩相拉伸线理方位($n = 19$),等值线为百分之一面积内 5.2% ~ 10.5% ~ 15.8%;C—超高压剪切带内面理极点($n = 41$),等值线为百分之一面积内 2.4% ~ 7.3% ~ 12.2% ~ 17.1%;D—超高压变质条件下形成的榴辉岩相线理($n = 12$), n —测量次数

榴辉岩类似。Zhang 等^[6]还详细地将其分作面理化

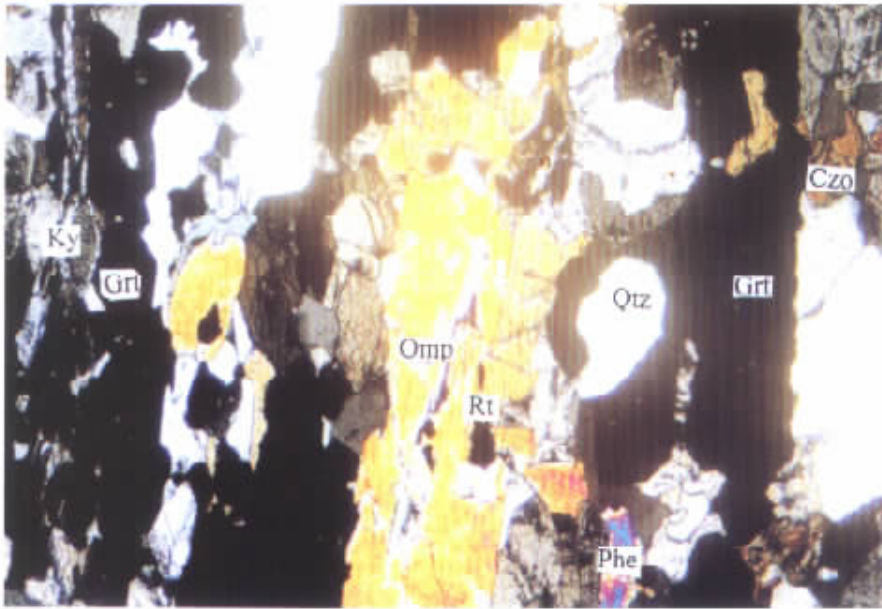


图3 碧溪岭超高压剪切带内榴辉岩相面理

Fig.3 Micrograph of eclogite-facies foliation in the ultrahigh-pressure shear zone from the Bixiling
标本号 $\gamma-205$;正交偏光 ;视域宽近 4 mm ;Omp—绿辉石 ;
Phe—多硅白云母 ;Ky—蓝晶石 ;Rt—金红石 ;Czo—斜黝帘石 ;Qtz—石英 ;Grt—石榴石

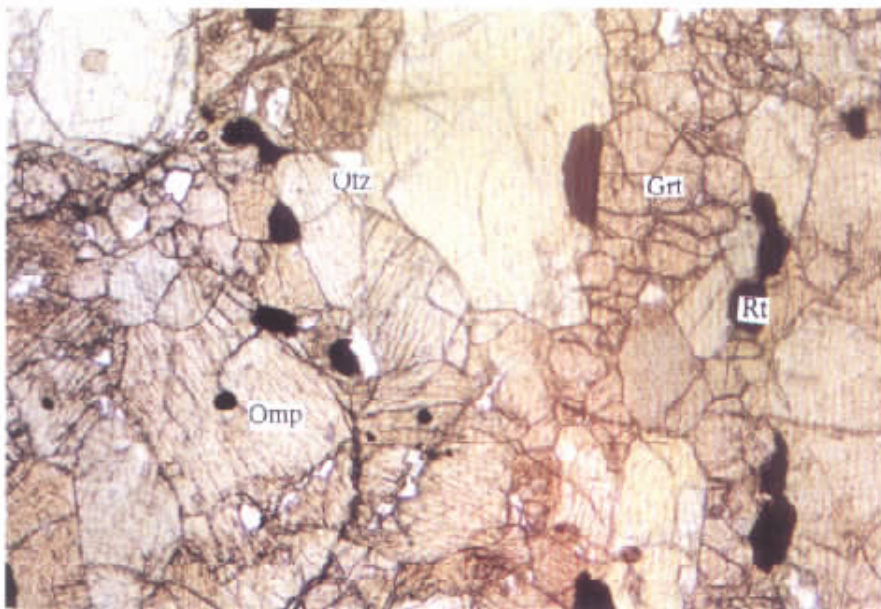


图4 具微弱面理的块状榴辉岩

Fig.4 Photomicrograph showing massive eclogite with weak foliation
标本号 $\gamma-2-11-7-2$;单偏光 ;视域宽约 4 mm ;Grt—石榴石 ;Omp—绿辉石 ;Rt—金红石 ;Qtz—石英

富蓝晶石榴辉岩及富黝帘石含滑石柯石英榴辉岩（见下）。

等。在矿物成分上与第一类相比，是岩石中除含石榴石、绿辉石、金红石和柯石英（或其假象）之外，一般都含蓝晶石、多硅白云母、黝帘石（斜黝帘石）及滑石。其最大特点是岩石发育明显的面理和线理组构

（2）超镁铁质岩石：统称石榴橄榄岩，在成分上包括石榴二辉橄榄岩、异剥橄榄岩及二辉岩等，主要组成矿物为石榴石、顽火辉石、透辉石和橄榄石等。在这些岩石中发现的钛斜硅镁石及菱镁矿等矿

物^[5,6]表明,超镁铁质岩石与榴辉岩一起,遭受过超高压变质作用,形成温度约 700~800 °C,压力高达 4.7~6.7 GPa,反映了更深的变质环境。

(3) 高压片麻岩:包括绿帘二云片麻岩、角闪白云母斜长片麻岩及绿帘斜长角闪岩等。矿物组合反映角闪岩相的变质环境。野外露头尺度及室内研究证实,这些片麻岩中含有榴辉岩的残块及阴影状残余的榴辉岩矿物组合,与榴辉岩体之间,呈渐变过渡关系,并具相似的 Nd 等同位素成分,表明这些片麻岩大部分是由榴辉岩减压退变而成的。所以,往往统称为高压(HP)片麻岩。

(4) 大理岩:以白云质及不纯大理岩为主,其中含几 cm 到几十 cm 大小的榴辉岩团块或包体。大理岩本身成强烈褶皱变形的透镜体散布于高压片麻岩之中。

(5) 含榴花岗岩:主要矿物组合为钠-奥长石+钾微斜长石+角闪石+黑云母+白云母+石英+绿帘石+石榴子石。发育与高压片麻岩的主面理产状一致的区域面理,含榴辉岩、退变质榴辉岩及高压片麻岩的包体,它们之间的边界较为明显。含榴花岗岩是超高压变质岩折返到中下地壳层位时减压部分熔融作用的产物,在地球化学上,具有 A 型花岗岩的一些特点^[29]。

3 同碰撞或挤压组构

与挪威西部片麻岩区及阿尔卑斯 Dora-Maira 地块的超高压变质带类似^[30,33],形成超高压变质岩石的同碰撞或挤压组构,只保留于较大的榴辉岩及其它超高压变质岩透镜体内部。高压片麻岩及含榴花岗岩中的组构,主要是在伸展体制及角闪岩相条件下形成的。

碧溪岭含柯石英的榴辉岩-镁铁质-超镁铁质杂岩体,曾被认为是大别山区最大的一个超高压变质岩体^[6,12]。经过详细的野外构造制图揭示(图 2),它实际上是由 3 个大的榴辉岩透镜体及为数众多的小透镜体组成的,并包裹在高压片麻岩及含榴花岗岩之中。3 个大的榴辉岩体出露面积分别为 0.27 km², 0.35 km² 及 0.04 km²,总面积约为 0.66 km²,占测区面积的 13%。在这些大的榴辉岩体内部,同碰撞或挤压组构样式主要表现为网络状超高压剪切带及透镜形块状榴辉岩组合,反映了区域上曾出现过的线状强应变带与透镜状弱应变域的

规律性组合图像^[34,35]。

超高压剪切带或强应变带内岩石,就是上述的面理化榴辉岩或榴辉岩糜棱岩,发育明显的面状和线状组构(图 3),由超高压榴辉岩相矿物的塑性变形拉长及晶体优选定向排列显示出来。其中石榴子石多呈拔丝结构(ribbon texture)及多晶集合体,长可达 10 mm,形态比(x/z)可达 10:1,内部新生颗粒粒径一般为 0.020~0.09 mm。绿辉石、蓝晶石、多硅白云母及黝帘石(斜黝帘石)为自形或半自形晶体,边缘具缝合线状,常出现膝折带、显微布丁及波状消光等塑性变形特征。在碧溪岭范围内,面状及线状组构的产状如图 2 中赤平投影图解 C、D 所示,其中面理的代表产状为 SE111°/75°。

透镜状弱应变域内的岩石为块状榴辉岩及石榴橄榄岩,发育微弱的面状组构,由宽板状绿辉石晶体的定向排列显示出来,但无论石榴子石(亦为多晶集

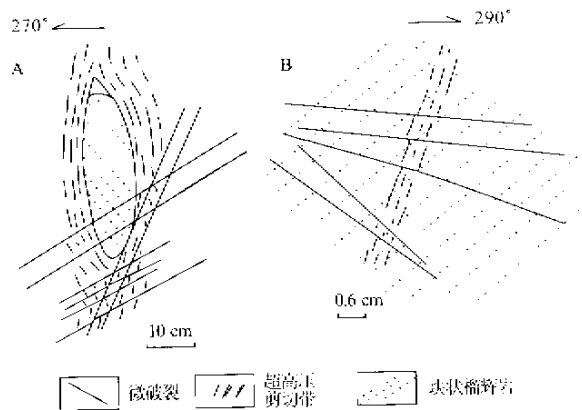


图 5 露头尺度上块状榴辉岩与超高压剪切带关系
Fig. 5 Field sketches showing relations between the massive eclogite and the UHP shear zone at the scale of outcrop

合体)绿辉石和金红石,矿物形态比都较小(图 4),一般 x/z 小于 23,岩石各向异性不甚明显,表明其虽然也遭受过剪切塑性变形,但剪切应变量较小。

在露头尺度上,超高压剪切带或强应变带与透镜状弱应变域的几何关系非常明确(图 5),显示超高压剪切带是叠加在块状榴辉岩之上的,由于由退变质的角闪石与斜长石组成的冠状体及后成合晶组合(symplektitic assemblage)均沿石榴子石和绿辉石等超高压变质寄主矿物边缘及内部裂隙分布,因而,块状榴辉岩中的弱面理及面理化榴辉岩中的强面状及线状组构,都是卸载不平衡结构冠状体及后成合晶生成之前的变形记录。据肖益林等^[14]的估算,后成合晶阶段的温压条件为 $t = 600\sim 700$ °C, $p = 0.91\sim 3$ GPa,而面理化榴辉岩形成阶段的温压条件大体为

$t = 770810\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 1.52.0\text{ GPa}$ 。柯石英榴辉岩形成阶段的温压条件为 $t = 840 \sim 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p > 2.8\text{ GPa}$ 。这些温压条件估算的准确性及地质意义暂且不论, 但它至少可指示超高压变质岩石, 在代表无应变减压退变质阶段的后成合晶组合发育之前, 已经发生过递进的应变分解过程, 并有相应的变形记录。这个阶段形成的超高压变质岩透镜体群, 由碧溪岭区详细的构造分析并结合整个大别—苏鲁超高压变质带内超高压剪切带的面状及线状组构的产状推测, 是按照其陡立的最大压扁面(xy 面)横向平行排列而成的, 因而, 按现今地理坐标, 总体代表了地壳近水平方向的挤压、缩短导致的一般剪切体制。

4 碰撞后伸展组构

在碧溪岭研究区内, 如上所述, 榴辉岩体只占总面积的 13%, 出露的大部分岩石主要是强烈变形的高压片麻岩及含榴花岗岩。在片麻岩和含榴花岗岩中, 发育区域性低缓角度的复合面理(composite foliation)和线理(图 2 中赤平投影图解 A, B), 复合面理与成分层平行, 区域面理代表产状 $SE100^{\circ} \angle 38^{\circ}$, 构成假单斜样式。面状组构及线状组构由角闪岩相矿物、片内无根褶皱、鞘褶皱及榴辉岩透镜体优选定向排列显示出来。依据各种剪切方向及应变标志, 如 $S-C$ 构造、不对称褶皱降向、榴辉岩透镜体形状及对称性、剪切条带组合等, 判断片麻岩及含榴花岗岩中发育的面理及线理, 代表了垂直面理的压扁及斜向剪切变形体制, 局部在岩石的 xz 剖面上测定的 S 与 C 面夹角一般为 20° , 考虑到临界剪应变($r \approx 3.5$)剪应变值为 5.8。在露头尺度上, 线理向面理走向的南西侧伏, 指明构造的上部沿着面理倾斜方向向南东运动并伴随着沿面理走向向南西方向的水平剪切位移, 三维空间显示张扭构造(transensional tectonics)的特点^[36, 37]。这里需要强调的是, 不仅是碧溪岭区, 在整个超高压构造岩石单位内, 区域性的面、线组构都很平缓(参见图 1), 有些区段的面理倾角多在 30° 之下, 只是在大型榴辉岩体边缘, 受榴辉岩体形状影响, 局部发生变化。

高压片麻岩及含榴花岗岩中发育的区域性面理, 环绕榴辉岩透镜体展布, 并切割和叠加榴辉岩体内部残存的超高压挤压组构, 两者代表了不同的变形环境及变形体制, 也反映了两个大的超高压变质岩石构造演化阶段。不难看出, 由角闪岩相岩石及

区域面理包裹的榴辉岩透镜体群, 是以它们的最大扁平面在近垂向上堆垛为特征的, 代表了近垂向上的韧性压扁及水平方向的拉伸作用^[26]。剖面及三维空间上, 也显示网状强应变带与弱应变域的组合关系。所以, 现在观察到的榴辉岩透镜体群, 是经过多期的递进应变分解作用的终级结果。

叠加于上述韧性变形之上的脆性构造, 如裂隙、断层和沿破裂分布的长英质脉体等变形, 以及大规模晚中生代侵入体就位反映的热-构造事件, 不属本文研究的范围。

5 讨论

5.1 应变分解作用

应变分解作用的实质是变形局部化^[38]。由于变形地质体组成、流变学及结构的不均一性, 在应力作用下, 力学不稳定性将在变形地质体内部强度较

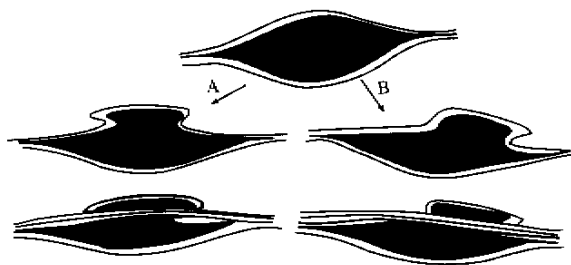


图 6 一个透镜状体在递进不均匀缩短作用(A)和递进不均匀简单剪作用(B)下的应变分解过程^[39]

(据 Bell 和 Rammond 修改, 1984)

Fig.6 Sketches showing strain partitioning of an ellipsoidal pod involving progressive bulk inhomogeneous shortening (A) and progressive inhomogeneous simple shear (B)

小的部分出现, 开始发生变形, 并逐渐发展成规模不等的线状强应变带或剪切带, 平行的或共轭的剪切带递进演化联合或相互交叉, 最终形成网络状型式。强度较大的部分, 应变相对较弱, 多形成透镜状形态。初始形成的弱应变域, 仍可在递进应变过程中, 进一步分解为规模更小的透镜体群, 如图 6 所示^[39]。

实际的例子, 在从造山带尺度至显微尺度, 均可观察到^[34, 35, 40]。碧溪岭地区 1:10 000 填图尺度上的变形图像, 具有残斑-基质流变学结构样式^[40]。在露头尺度上, 如石榴橄榄岩体, 也呈残斑-基质结构型式(图 7), 残斑为弱应变域, 由块状石榴橄榄岩

(包括石榴橄榄二辉岩及石榴二辉橄榄岩)组成, 基质为强应变带, 面状及线状构造明显, 由强蛇纹石化石榴橄榄岩组成。由此可以推断, 虽然弱应变带及强应变带的矿物成分及结构很不相同, 但是, 它们可能是由于应变分解过程中组成及结构的变化结果, 不一定纯是原始成分上的差异表现。同样, 块状榴辉岩和面理化榴辉岩, 或深色榴辉岩和浅色榴辉岩^[20], 主要也是在挤压体制及超高压榴辉岩相条件

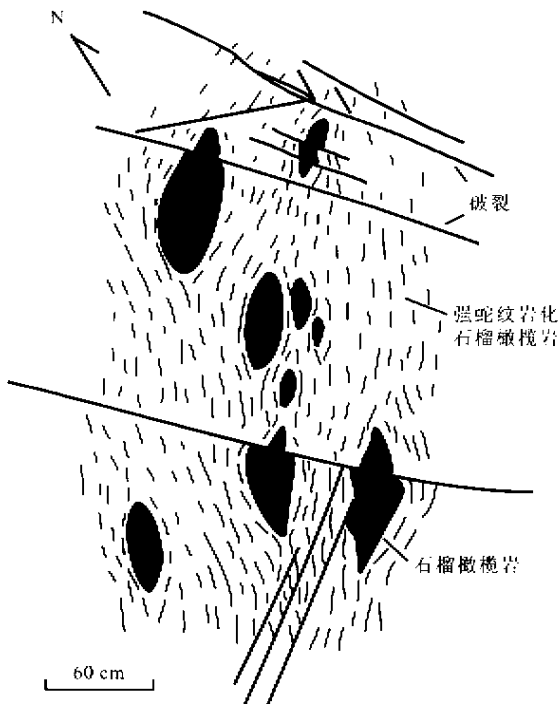


图7 在碧溪岭一个石榴橄榄岩体内部的碎斑-基质流变学结构样式。

Fig.7 Sketch showing the clast-matrix rheology texture in a garnet peridotite body from Bixiling

下应变分解作用的结果, 尽管我们并不排除两者在超高压变质作用之前原岩成分可能存在着一定差别。碰撞后伸展构造阶段的应变分解作用是在角闪岩相条件下进行的, 其透镜状弱应变带由榴辉岩(包括块状及面理化榴辉岩)组成, 而强应变带则由高压片麻岩及含榴花岗岩组成, 二者(两相物质流变学组合)也呈残斑-基质流变学结构样式。由此认识出发, 结合榴辉岩体与高压片麻岩间过渡接触关系, 片麻岩中残留的榴辉岩团块、条带及矿物组合等事实, 可以推想, 就碧溪岭地区而言, 除含榴花岗岩之外, 整体岩石都曾可能遭受过超高压变质作用。现今观察到的变形图像, 是多期递进应变分解作用的综合结果, 不能直接依据现存露头不同岩性的几何配置关系, 推断原岩的成层序列。

5.2 同位素年代学资料的地质意义

近年来, 运用各种方法和在不同实验室测定的结果表明, 大别—苏鲁区超高压峰期变质作用的年龄为 245 ~ 210 Ma^[13, 23, 41], 也大体代表中朝与扬子克拉通之间的碰撞时限。Hacker 等^[41]还进一步指出, 245 Ma 代表超高压变质作用的时期, 而 219 Ma 代表压力峰期的时期。这些论述, 也得到古地磁资料的支持^[42, 44]。不过, 关于大别—苏鲁区超高压变质岩形成时代问题并未彻底解决, 争议和分歧仍然存在。就碧溪岭地区而言, 据程裕淇等^[20]的统计, 至今已有 20 多个 U-Pb 同位素年龄数据, 多条 Sm-Nb 内部等时线年龄, 为数众多的白云母、石榴子石和绿辉石的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄^[7, 10, 11, 13, 19]。这些数据大体上可分成 5 组, 即新太古代、新元古代、加里东期、印支期和燕山期。新近, 程裕淇等^[20]运用精细的 SHRIMP 分析方法, 对碧溪岭地区的深色榴辉岩及片麻状花岗质岩石中的具双层及多层结构的锆石进行了同位素年代学研究, 得出结论, 认为超高压变质作用事件年龄为 (757 ± 7) Ma, 而 (223 ± 3) Ma 则代表印支期一次后期流体改造事件的年龄。

我们认为, 随着同位素年代学测试技术的不断提高, 所获取的年代学数据, 都可能是接近实际的。问题主要在于对这些数据地质意义的解释和判断方面, 仁者见仁, 智者见智。比如, 在大别—苏鲁地区对双层或多层结构的锆石, 不少学者用多种方法都获得了 > 700 Ma 的核部年龄, 并解释其代表原岩形成或深成花岗岩就位时限^[15, 41, 45, 46], 锆石核部属于继承性捕获晶体。Maruyama 等^[47]曾报道一个采自五庙地区的样品实例(见图 1), 运用 SHRIMP 分析方法得出结果, 认为具 3 层结构的锆石中层和外层年龄, 分别代表超高压变质作用事件(220 ~ 238 Ma)及退变质的角闪岩相变质作用事件(214 ~ 220 Ma)的结晶时限。

一方面, 我们应当继续进行同位素年代学的研究和测定工作, 提高采样、制样和分析质量, 增强所得数据的可信程度, 但另一方面, 又不能把所得数据绝对化, 要从地质事实依据上认真分析, 判断其真实的地质意义。否则, 获得一个数据就代表一次超高压变质作用事件, 那么, 大别—苏鲁区就不仅是遭受过 2 次或 3 次超高压变质作用事件了, 可能要遭受过无数次超高压变质作用事件, 这就导致人为的复杂化了。从理论上来说, 大别—苏鲁区可能曾经历过多期超高压—高压变质作用, 但是, 从关键构造部

位构造和区域上变形历史及构造框架的观察研究来看, 在其主体部分并未能识别出不同期超高压变质作用的变形、热事件及构造演化的记录。就碧溪岭地区而言, Chavagnac 和 Jahn^[12]用 Sm-Nd 法获得超高压变质作用年龄为 220210 Ma, 据其描述的测试样品岩相学特征判断, 主要反映面理化榴辉岩的形成年龄。因而, 块状榴辉岩及面理化榴辉岩, 都应是同一超高压变质阶段递进应变分解作用的结果, 形成虽有先后, 但其时间间隔, 依据矿物组合及变质条件, 参考区域上可利用的大量年龄数据推测不会超过 10~20 Ma。Jahn 等^[16]在碧溪岭采集的花岗质片麻岩样品, 利用全岩-白云母 Rb-Sr 方法得出 174 Ma 年龄数据, 而从高压片麻岩中采集的样品, Rb-Sr 黑云母-全岩等时线年龄为 $(179 \pm 4) \text{Ma}$ ^[12], 结合其它地点获得的年龄资料^[4850]判断, 它们可代表碰撞期后伸展构造作用的上限^[26]。区域上, 大规模的燕山晚期未变形的花岗岩、岩墙群及镁铁质和超镁铁质侵入体, 穿切区域性缓倾斜的伸展面理, 因而, 本文讨论的变形, 都是未变形块状侵入体就位前的构造记录。所以, 以现有的构造资料分析, 不支持大别—苏鲁区主体经历过多期超高压变质作用的推论。

5.3 超高压变质岩折返模式

就大别—苏鲁超高压变质带而言, 曾提出各种不同的模式, 解释大陆深俯冲产生的超高压变质岩石的折返过程^[3, 47, 51, 52]。笔者曾提出一个超高压变质岩石 3 阶段的折返模式^[26], 强调伸展体制在超高压变质岩石由中、下地壳向中、上地壳折返过程中的重要作用。通过新近几个关键地点特别是在大别山碧溪岭以及苏鲁地区的东海、荣城等地的详细构造观察和制图, 收集到更为丰富和准确的运动学标志, 表明在造山带尺度上, 伴随着垂向上的薄化缩短及近水平方向的伸展流动, 无论是沿着地壳尺度的伸展拆离带还是在 UHP 构造岩石单位内部, 都存在一定的相对变质核杂岩单位顺时针方向的旋转剪切变形, 与此同时, 至少在大别山范围内, 超高压和高压变质带主体沿着北部左行边界剪切带(八里畈—磨子潭—晓天剪切带)及南部右行边界剪切带(大山口剪切带)^[28]向东侧向挤出^[52], 整体上表现为张扭性构造。因之, 张扭性变形是大别—苏鲁超高压变质岩石一种重要的折返模式, 体现了纯剪及单剪体制的联合作用。将有另文详细讨论。

至于碰撞或挤压组构, 只残留于榴辉岩或其它超高压变质岩透镜体内部, 虽然它们才可能代表大

陆碰撞阶段的运动方向, 但仅仅根据碧溪岭地区的有限资料, 是难于恢复区域构造运动格式的, 尚需在更大范围内进行仔细的观察、对比和复原平衡研究工作。

6 结论

通过碧溪岭大比例尺精细构造制图和构造分析, 可得出下列初步结论:

(1) 区域性构造主要代表碰撞期后伸展体制及角闪岩相条件下的变形记录。而同碰撞或挤压构造只保留于大的榴辉岩及其它超高压变质岩透镜体内部。

(2) 应变分解在同碰撞或挤压体制及碰撞期后伸展体制变形过程中都起重要作用, 其结果是形成透镜状弱应变域和网状强应变带规律组合格式, 呈残斑-基质流变学结构。表明除含榴花岗岩之外, 主要的岩石都曾遭受过超高压变质作用。支持榴辉岩“原地”成因观点。

(3) 主要依据构造学及岩石学资料推论, 超高压变质作用事件的时限为 245~220 Ma, 碰撞期后伸展变形时期为 200~170 Ma。不支持碧溪岭区发生过多期超高压变质作用的推论。

参考文献:

- [1] 韩宗珠, 袁林, 盛兴土. 安徽岳西碧溪岭榴辉岩及伴生石榴石橄榄岩的岩石学和地球化学[J]. 岩石学报, 1989(4): 22-33.
- [2] 张泽明. 安徽岳西地区的含白云石柯石英榴辉岩[J]. 岩石学报, 1992(1): 25-39.
- [3] OKAY A I, SENGOR A M C, SATIR M. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: the Dabie Shan/Tangbai Shan orogen, China[J]. *Tectonics*, 1993, 12(6): 1320-1334.
- [4] 张旗, 赵大升, 刘若新, 等. 安徽岳西县碧溪岭—五河地区石榴石橄榄岩-榴辉岩组合的原岩性质[J]. 科学通报, 1999, 38(18): 1694-1697.
- [5] ZHANG R Y, LIOU J G. Significance of magnetite paragenesis in ultrahigh-pressure metamorphic rock[J]. *Am Mineralogist*, 1994, 79: 397-400.
- [6] ZHANG R Y, LIOU J G, CONG B L. Talc-, magnetite- and Ti-clinohumite-bearing ultrahigh-pressure meta-mafic and ultramafic complex in the Dabie Mountains, China[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 1011-1037.
- [7] 刘若新, 樊祺诚, 李惠民, 等. 大别山碧溪岭石榴橄榄岩-榴辉岩体的原岩性质及同位素年代学的启示[J]. 岩石学报, 1995, 11(3): 243-256.

- [8] 樊祺诚, 刘若新, 张旗, 等. 大别山超高压变质带镁铁-超镁铁岩的岩石学与超高压矿物组合[J]. 中国科学, 1996, 26(3): 265-270.
- [9] YE K, YAO Y, KATAYAMA I, et al. Large area 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[J]. *Lithos*, 2000, 52: 157-164.
- [10] 曹荣龙, 朱寿华. 安徽碧溪岭含柯石英榴辉岩的 U-Pb 与 ^{39}Ar 年代学研究[J]. 地球化学, 1995, 24(2): 152-163.
- [11] 曹荣龙, 朱寿华. 大别山含柯石英榴辉岩区——一个晚太古代的超高压变质带[J]. 地质学报, 1995, 69(3): 232-242.
- [12] CHAVAGNAC V, JAHN B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications[J]. *Chemical Geology*, 1996, 133: 29-51.
- [13] 李曙光, JAGOUTZ E, 肖益林, 等. 大别山—苏鲁地体超高压变质年代学——I. Sm-Nd 同位素体系[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3): 246-257.
- [14] 肖益林, 傅斌, 李曙光, 等. 大别山碧溪岭榴辉岩变质温压条件计算及氧同位素研究[J]. 地球学报, 1997, 18(3): 318-323.
- [15] 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[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 151: 191-203.
- [16] JAHN B M, CORNICHE J, HENIN O, et al. Geochemical and isotopic investigation of ultrahigh pressure (UHP) metamorphic terranes in China: Su-Lu and Dabie complexes[A]. *Workshop on Ultrahigh-P Metamorphism and Tectonics, Stanford, Calif* [C], 1994. A71-74.
- [17] JAHN B M. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites of the Dabie orogen: Implications for continental subduction and collisional tectonics[A]. HACKER B, LIOU J G. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks* [M]. Dordrech: Kluwer Acad Publ, 1998. 203-239.
- [18] JAHN B M. Sm-Nd isotope tracer study of UHP metamorphic rocks: Implications for continental subduction and collisional tectonics[J]. *International Geology Review*, 1999, 41: 859-885.
- [19] 胡世玲, 郝杰, 李日俊, 等. 大别山碧溪岭榴辉岩激光探针 ^{39}Ar - ^{39}Ar 年龄[J]. 地质科学, 1999, 34(4): 427-431.
- [20] 程裕淇, 刘敦一, WILLIAMS I S, 等. 大别山碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石 SHRIMP 分析——晋宁期高压-超高压变质作用同位素年代学依据[J]. 地质学报, 2000, 74(3): 193-205.
- [21] BELL T H. Deformation partitioning and porphyroblast rotation in metamorphic rocks: a radical reinterpretation[J]. *J Metamorphic Geol*, 1985, 3: 106-118.
- [22] LIOU J G. Petrotectonic summary of less intensively studied UHP region[J]. *International Geology Review*, 1999, 41: 571-586.
- [23] LIOU J G, ZHANG R Y, JAHN B M. Petrology, geochemistry and isotope data on a ultrahigh-pressure jadeite quartzite from Shuanghe, Dabie Mountains, east-central China[J]. *Lithos*, 1997, 41: 59-78.
- [24] CONG B, WANG Q, ZHAI M. New data regarding hotly debated topic concerning UHP metamorphism of the Dabie-Sulu belt, east-central China[J]. *International Geology Review*, 1999, 41: 827-835.
- [25] SUO S, ZHONG Z. Sequence of ductile shear zones in UHP metamorphic province within Dabie massif, China[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1998, 9: 189-195.
- [26] SUO S, ZHONG Z, YOU Z. Extensional deformation of post ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation process of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie massif China[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(3): 225-236.
- [27] ZHONG Z, SUO S, YOU Z. Regional-scale extensional tectonic pattern of ultrahigh-pressure and high-pressure metamorphic belts from the Dabie massif, China[J]. *International Geology Review*, 1999, 41: 1033-1041.
- [28] 索书田, 桑隆康, 韩郁菁, 等. 大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- [29] ZHONG Z, ZHANG H, SUO S, et al. Partial melting processes during exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Dabieshan, China[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 1999, 10(3): 194-199.
- [30] ANDERSEN T B, JAMTVEIT B. Uplift of deep crust during orogenic extensional collapse: a model based on field studies in the Song-Sunnfjord region of western Norway[J]. *Tectonics*, 1990, 9(5): 1097-1111.
- [31] DEWEY J F, RYAN P D, ANDERSEN T B. Orogenic uplift and collapse, crustal thickness, fabrics and metamorphic phase changes: the role of eclogites[A]. PRICHARD H M, ALABASTER T, HARRIS N B W, et al. *Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geological Society Special Publication No. 76* [C], 1993. 325-343.
- [32] FOSSEN H. Extensional tectonics in the Caledonides: Synorogenic or postorogenic[J]? *Tectonics*, 2000, 19(2): 213-224.
- [33] HENRY C, MICHARD A, CHOPIN C. Geometry and structural evolution of ultra-high-pressure and high-pressure rocks from the Dora-Maira massif, Western Alps, Italy[J]. *Journal of Structural Geology*, 1993, 15(8): 965-981.
- [34] ARCHAMBAULT G, DAIGNEAULT R, ROUJEAU A. Mechanics of shear zones and fault belts development by anastomosing patterns of fractures at all scales[A]. ROSSMANITH H P. *Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Balkema* [M]. Rotterdam [s. n.], 1990. 197-204.
- [35] 索书田. 造山带的网结状构造样式[J]. 地质科技情报, 1993, 12(2): 1-7.
- [36] KRABBENDAM M, DEWEY J F. Exhumation of UHP rocks by transtension in the Western Gneiss Region, Scandinavian Caledonides [A]. HOLDSWORTH R E, STRACHAN, DEWEY J F. *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics* [M]. [s. l.]: Geol Soc Spec Publ, 1998. 135, 159-181.
- [37] FOSSEN H, TIKOFF B. Extended models of transpression/transtension and application to tectonic settings[A]. HOLDSWORTH R E, STRACHAN R A, DEWEY J F. *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics* [M]. [s. l.]: Geol Soc Spec Publ, 1998.

- 135, 15-33.
- [38] VIGNERESSE J L, TIKOFF B. Strain partitioning during partial melting and crystallizing felsic magmas[J]. *Tectonophysics*, 1999, 312 : 117-132.
- [39] BELL T H, RAMMOND R L. On the internal geometry of mylonite zones[J]. *Journal of Geology*, 1984, 92(6): 667-686,
- [40] HANDY M R. The solid-state flow of polymineralic rocks[J]. *J Geophys Res*, 1990, 95(B6): 86478661.
- [41] HACKER B R, RATSCHBACHER L, WEBB L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161 : 215-230.
- [42] ZHAO X, COE R. Palaeomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China[J]. *Nature*, 1987, 327 : 141-144.
- [43] GILDER S, COURTILLOT V. Timing of the North-South China collision from new middle to late Mesozoic paleomagnetic data from the North China block[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102, 17713-17727.
- [44] EIDE E A, LIOU J G. High-pressure blueschists and eclogites in Hong'an : a framework for addressing the evolution of high and ultrahigh-pressure rocks in central China[J]. *Lithos*, 2000, 52 : 1-22.
- [45] AMES L, ZHOU G, XIONG B. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China[J]. *Tectonics*, 1996, 15 : 472-489.
- [46] MARUYAMA S, TABATA H, NUTMAN A P, et al. SHRIMP U-Pb geochronology of ultrahigh-pressure metamorphic rocks of the Dabie Mountains, central China[J]. *Continental Dynamics*, 1998, 3(1-2): 72-85.
- [47] MARUYAMA S, LIOU J G, ZHANG R Y. Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure (UHP) and high-pressure (HP) metamorphic belts from central China[J]. *The Island Arc*, 1994, 3(3): 112-121.
- [48] 牛宝贵, 富云莲, 刘志刚, 等. 鄂北蓝片岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年及其地质意义[J]. *科学通报*, 1993, 38(14): 1309-1313.
- [49] 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 等. 大别造山带冷却年龄的⁴⁰Ar/³⁹Ar 和裂变径迹年龄测定[J]. *中国科学(B 辑)*, 1995, 25(10): 1085-1092.
- [50] HACKER B R, WANG Q. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism[J]. *Tectonics*, 1995, 14(4): 944-1006.
- [51] WANG Q, LIU X, MARUYAMA S, et al. Top boundary of the Dabie UHPM rocks, central China[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1995, 11(4): 295-300.
- [52] HACKER B H, WANG X, EIDE E A, et al. Qinling-Dabie ultrahigh-pressure collisional orogen[A]. YIN A, HARRISON T M. *The Tectonic Evolution of Asia*, Rubey 1X[M]. Cambridge UK : Cambridge Univ Press, 1996. 345-370.

STRUCTURAL ANALYSIS OF UHP METAMORPHIC ROCKS IN THE BIXILING AREA, DABIE MOUNTAINS, CHINA

SUO Shu-tian^{1 2}, ZHONG Zeng-qiu², ZHOU Han-wen², YOU Zhen-dong²

(1. Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China 2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract : The detailed structural mapping at a scale of 10 000 and structural analysis for the Bixiling area, Dabie Mountains, China have shown that it is a typical occurrence of UHP metamorphic rocks, in a structurally lower position of the UHP unit. Both the contractional deformation related to Triassic collision between the Sino-Korea and Yangtze cratons, and the deformation related to the post-Triassic collisional extension have an anastomosing structural pattern with lens-shaped domains of low strain separated by ductile shear zones of high strain. In the case of UHP eclogite facies deformation, the lens-shaped domains consisting of the massive eclogite and garnet peridotite with a weak foliation are surrounded by UHP shear zones. Rocks in the UHP shear zones are foliated eclogites with a steeply dipping mylonitic foliation and lineation. The present main structure of the UHP unit in the Bixiling area was formed mainly by extensional processes following the collision. It is characterized by a pseudomonoclinic structure in which eclogite bodies are enclosed by an amphibolite facies matrix consisting of HP gneisses and garnet-bearing granites, with a gently dipping compositional layering and pervasive foliation and lineation. The compositional layering, as seen in outcrops, no longer provides information concerning stratigraphy or gross distribution of stratigraphy horizons. This clast-matrix-type rheology may be observed at all scales from centimeters to kilometers. The initial protolith composition, rheology

and fabrics anisotropy of the rocks would affect the behavior of the structural pattern, but multiphase and progressive strain partitioning is mainly responsible for the anastomosing structural pattern. It is argued that the preserved eclogites, which now constitute perhaps 13% of the UHP unit, are not merely isolated exotic bodies tectonically employed into the amphibolite facies gneiss but represent remnants of an once pervasive or widespread eclogite facies terrain. The petrological and geometrical relationships strongly support on in-situ origin of the UHP eclogites in this area. An entire tectonic evolution process for the UHP metamorphic rocks is deduced from the structural evidence and combined with previous petrographic and chronological data, in which the age of 245 ~ 210 Ma is considered as the most reliable estimate for the time of the UHP metamorphic event, and the post-collisional extension or transtension is mainly dated about 200 ~ 170 Ma. Moreover, structural records do not support the idea that the rocks have undergone polyphase UHP metamorphism in the Bixiling area.

Key words :Dabie – Sulu UHP metamorphic belt ;Bixiling area ; eclogite ; syncollisional structure ; strain partitioning ; transtensional tectonics