

# 南秦岭下地壳组成及岩石圈的拆离俯冲作用

路凤香<sup>1</sup> 王春阳<sup>1</sup> 胡宝群<sup>2</sup> 吴其反<sup>3,4</sup> 郑建平<sup>1</sup>

(1.中国地质大学,湖北 武汉 430074;2.东华理工学院,江西 抚州 344000;  
3.清华大学工程物理系,北京 100084;4.国土资源部航空物探遥感中心,北京 100083)

**摘要:**根据新提供的 Pb 同位素组成及岩石地球化学研究成果,本文进一步证实了位于北秦岭北界的明港地区发育的早中生代安山玄武质火山角砾岩岩筒所携带的下地壳捕虏体属于南秦岭。所恢复的南秦岭下地壳剖面自下而上为:底侵成因的变辉长岩—基性麻粒岩(其中含有榴辉岩及辉石岩的透镜体)—酸性麻粒岩。秦岭造山带总体的岩石圈模型为:南秦岭(扬子块体)向北拆离俯冲,北秦岭地壳向北仰冲,华北岩石圈呈楔状插入秦岭造山带,拆离面约在中、下地壳之间。南秦岭俯冲岩片延伸的范围在平面上有可能达到 400 km。

**关键词:**下地壳;Pb 同位素组成;;岩石圈;拆离俯冲作用

中图分类号:P542<sup>+</sup>.5 文献标识码:A 文章编号:1000-3657(2003)02-0113-07

在造山带研究中,岩石圈的组成和深部作用历来受到地质学家的关注,崔军文<sup>[1]</sup>提出了 3 种“特提斯—喜马拉雅域巨型造山复合体”的岩石圈组构类型:喜马拉雅冲断—叠覆型、青藏走滑—拉伸型和昆仑—阿尔金—祁连逆冲—扩展型,并进一步揭示了造山复合体的深部过程。钟大赉等<sup>[2]</sup>应用地质、地球物理资料相结合的方法,对滇川西部古特提斯造山带进行了构造—地球物理单元的划分,并对各单元内部的岩石圈深部作用做了分析。欧洲地学断面的成果表明<sup>[3]</sup>,造山带的岩石圈结构与稳定地块有显著差异,以穿过波罗的(Baltic)地盾中的太古宙陆核部分的地震资料显示,各构造层界线平直、稳定,Moho 面两侧波速相差大( $\Delta V_p=0.9$  km/s),地壳内部没有低速层发育;相反,穿过造山带自南阿尔卑斯(Alps)至北亚平宁(Apennines)山脉的资料显示,Moho 面在断面 160 km 长的范围内厚度变化达 20 km,壳内低速层发育,北部地幔内部 60 km 深处出现波速为 6.5 km/s 的低速楔状体,南部地壳内部出现 8.0 km/s 的高速楔状体,形成不同波速物质相互穿插、叠置的复杂图像,暗示了岩石圈深部作用的多元复杂过程。

秦岭造山带的岩石圈结构是当今地学研究的重要组成部分,前人进行了多项工作,取得了很好的成果<sup>[4-14]</sup>。成果显示,秦岭造山带的地壳结构也呈现出了类似欧洲地学断面的复杂图像<sup>[11-12,14]</sup>,但是秦岭的地震资料多限定在地壳,相应的地质解释也主要在地壳部分。笔者曾提出过在秦岭造山带,南秦岭(扬子陆块)在碰撞造山过程中向北发生过拆离俯冲作用<sup>[15]</sup>,即南秦岭在向北俯冲时,在地壳上部和下部之间发生过拆离,其中的上部垫置于北秦岭之下;其中的下部继续向北俯冲于华北块体之下<sup>[15]</sup>。本文将提供新的 Pb 同位素及捕虏体的年龄资料建立南秦岭俯冲岩石圈下地壳的物质组成剖面,进一步阐明南秦岭的拆离俯冲作用,并讨论造山带下部岩石圈剖面的恢复方法。

## 1 明港地区下地壳的组成剖面

### 1.1 深源捕虏体的岩石类型

河南明港位于秦岭造山带与华北地块的交界处(图 1),该区发育了早侏罗世安山玄武质的火山角砾岩脉—岩筒群,目前发现了 14 个岩体,但多数风

收稿日期:2002-12-25;改回日期:2003-02-20

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999075503);国土资源部地质大调查项目(20001010203)联合资助。

作者简介:路凤香,女,1935年生,教授,主要从事火成岩及地幔岩石学研究;E-mail: lufx@263.net.

化强烈,仅 B7 号岩体比较新鲜。角砾含量最高达 50%以上,角砾为来自深部及围岩的各种岩石类型的捕虏体,为恢复岩石圈下部的物质组成和结构提供了有利的条件。野外采集到的有:滑石化尖晶石二辉橄榄岩、辉石岩、榴辉岩、基性麻粒岩、长英质麻粒岩、变辉长岩、角闪岩以及花岗岩等。除角闪岩及花岗岩外,其他岩石都未在围岩中发现,属于火山岩所携带的来自下地壳—上地幔深源物质。按照国内外前人研究深源捕虏体的惯用方法,可以应用所计算的温、压条件恢复上地幔—下地壳的柱状剖面。已获得的基性麻粒岩变质的峰期温、压为 962 °C, 1.45 Gpa (48 km)<sup>[10]</sup>,据此推断,当时地壳厚度为 48 km 以上。根据一般公认的原则,上述岩性自地幔向上的排布应为:尖晶石二辉橄榄岩(地幔部分)→基性麻粒岩(下地壳)→酸性麻粒岩(下地壳上部)→角闪岩(中地壳),榴辉岩和辉石岩可能位于下地壳或上地幔上部。然而由于造山带岩石圈结构的复杂多样性,上地幔—下地壳的剖面必须在详细的岩石地球化学研究的基础上,特别是要确定样品的块体归属后才能建立。

## 1.2 麻粒岩捕虏体是属于北秦岭的下地壳么?

尽管角砾岩岩筒位于北秦岭北缘,但是必须首先确定这些捕虏体是属于北秦岭、或南秦岭、或华北陆块。所采集的麻粒岩多数为基性辉石麻粒岩,由次透辉石(30%~35%)、石榴石(25%~35%)、斜长石(20%~30%)、褐色角闪石(5%~7%)、金红石(2%~3%)及少量钾长石组成,需要强调的是,捕虏体麻粒岩不含斜方辉石,属高压单斜辉石麻粒岩。捕虏体中的酸性麻粒

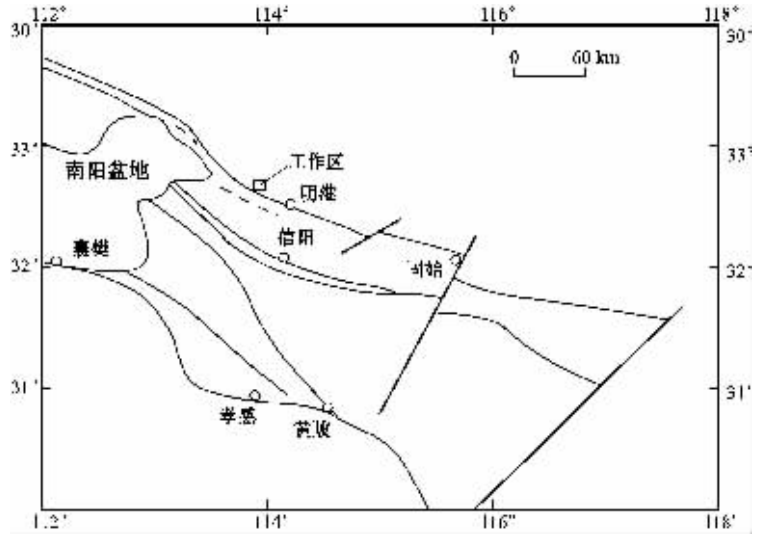


图 1 工作区位置简图

Fig. 1 Location of the work area

岩主要矿物有石英、碱性长石、石榴石及辉石,后两种矿物含量少于 10%。根据矿物组合及前人所做的温、压计算,捕虏体麻粒岩均为下地壳的物质组成。

地球化学的研究证实,Pb 同位素明显地受区域基底的控制,不同的块体内部具有高度的耦合现象,而且有各自的 Pb 同位素演化趋势。因而在构造分区及演化等方面具有良好的约束作用,此外,与 Sr、Nd 同位素组成一样,在岩浆源区示踪方面也是一个十分有效的方法。为了进一步研究麻粒岩的块体归属,在表 1 中列举了各种麻粒岩类型,包括基性、酸性、粗粒、细粒在内的放射性 Pb 同位素组成,它们的成分变化范围不大,基性麻粒岩  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 38.167~38.374,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 15.342~15.530,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 17.008~17.945 之间;酸性麻粒岩的 3 个比值分别为 38.578, 15.497 和 18.358。

表 1 明港地区深源捕虏体 Pb 同位素组成

Table 1 Lead isotopic composition of deep-seated xenoliths in the Minggang area

序号	样号	样品名称	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	资料来源
1	Y-99-51(X)	寄主岩	38.981	0.004	15.441	0.002	17.945	0.002	本文
2	YZ-2	粗粒麻粒岩	38.257	0.003	15.530	0.001	17.945	0.001	本文
3	YZ-4	榴辉岩	38.178	0.009	15.496	0.004	17.768	0.004	本文
4	YZ-6	细粒麻粒岩	38.167	0.005	15.496	0.002	17.921	0.002	本文
5	Y-99-17	浅色麻粒岩	38.578	0.008	15.497	0.005	18.358	0.005	本文
6	Y-99-50	角闪石化金云母辉石岩	38.578	0.010	15.429	0.004	17.580	0.003	本文
7	Y92-050	基性麻粒岩	38.273	0.004	15.342	0.001	17.116	0.002	[15]
8	Y92-045	基性麻粒岩	38.374	0.004	15.387	0.002	17.008	0.002	[15]
9	Y92-030	基性麻粒岩	38.291	0.008	15.448	0.003	17.825	0.004	[15]

注:序号 1-6 为中国地质大学国土资源部壳-幔开放实验室分析,其他引自参考文献[15]。

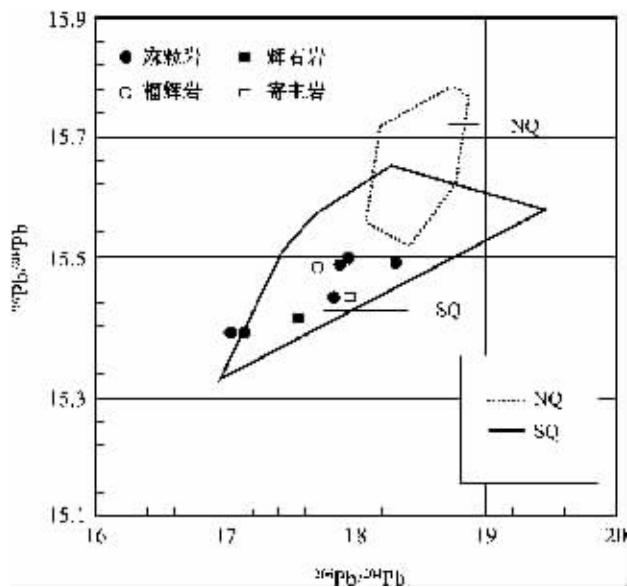


图 2 明港地区麻粒岩的 Pb 同位素组成投点(南、北秦岭的 Pb 同位素范围,据张本仁等简化<sup>[17]</sup>)

Fig. 2 Plot of the lead isotopic composition of granulite in the Minggang area

将 Pb 同位素资料投点(图 2)并与秦岭的基底岩系进行对比,可以获得以下信息:

(1) 酸性麻粒岩的 Pb 同位素比值高于基性麻粒岩,这与二者具有分异关系所表现的 Pb 同位素演化趋势相吻合。

(2) 所有的麻粒岩 Pb 同位素成分点都无一例外地落于南秦岭的范围内,不仅未出现在北秦岭区,而且也没有出现在南、北秦岭的重叠区,因此麻粒岩应该属于南秦岭块体无疑。

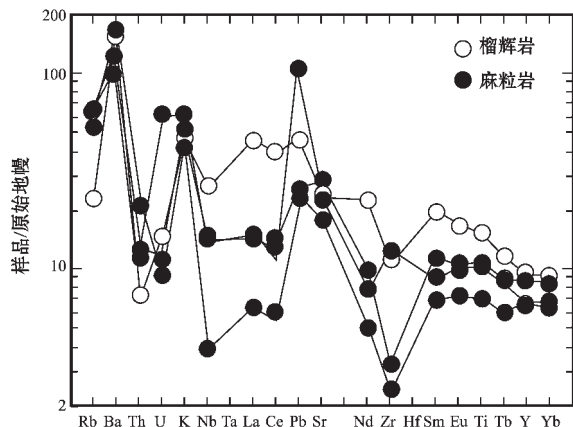


图 3 捕虏体麻粒岩与榴辉岩的微量元素蛛网图

Fig. 3 Spidergram of trace elements of xenolith granulite and eclogite

(3) 寄主岩安山玄武岩与上述下地壳岩石的 Pb 同位素组成相同,推测寄主岩岩浆的源区与南秦岭下地壳密切相关。

### 1.3 其他的下地壳组成

据岩石学研究<sup>[15]</sup>,捕虏体榴辉岩由绿辉石、石榴石、金红石、白云母、磷灰石及石英组成,前两种矿物占 90%以上,该岩石不属于典型的榴辉岩,测定的辉石成分 Jd 含量较低(<20%),Na<sub>2</sub>O 低于 4%(2.92%~3.60%),有可能是高压麻粒岩与典型榴辉岩的过渡类型。图 3 显示,榴辉岩微量元素的配分形式与麻粒岩相似,因此表明它们都属于南秦岭的下地壳组成。此外,辉石岩、榴辉岩的 Pb 同位素组成与麻粒岩也同样落于南秦岭区(图 2),进一步证实它们也是南秦岭下地壳的组成。

### 1.4 变辉长岩在下地壳中的位置

捕虏体中变辉长岩的数量较多,具变余辉长结构,主要矿物为辉石与斜长石,二者含量有变化,可分为浅色和暗色两类。岩石明显受到蚀变,斜长石变为绢云母,辉石蚀变为透闪石和帘石类,在斜长石与辉石之间普遍发育有石榴石的冠状体,岩石中除石榴石外其他矿物都受到蚀变,无法计算岩石的平衡温度和压力,但根据石榴石的成分(Alm<sub>48</sub>Gro<sub>13</sub>Py<sub>31</sub>)中钙铝榴石含量较高,推测石榴石冠状体形成于降温或增压的条件。变辉长岩的 SiO<sub>2</sub> 含量(51.56%~54.20%)高于基性麻粒岩 SiO<sub>2</sub> 含量(46.32%~48.82%),其他主元素的含量变化范围较宽。变辉长岩 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 14.36%~21.48%,FeO+MgO 为 8.56%~18.26%,CaO 为 7.4%~8.95%,K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O

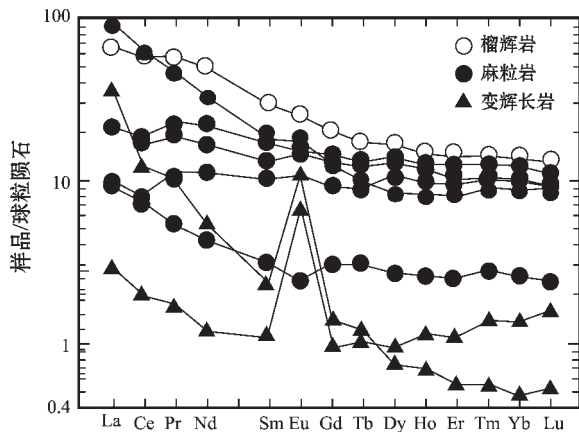


图 4 麻粒岩与变辉长岩的 REE 配分图解

Fig. 4 REE distribution diagram of granulite and metagabbro

为 2.57%~5.34%，基性麻粒岩  $Al_2O_3$  为 14.42%~15.62%， $FeO + MgO$  为 19.46%~21.69%， $CaO$  为 8.41%~10.69%， $K_2O + Na_2O$  为 3.20%~5.26%。二者的 REE 配分形式也有显著差别(图 4)，前者有明显的 Eu 的正异常且 REE 总量低于后者。

因此从上述岩石地球化学的资料中可以看出，变辉长岩与麻粒岩在岩石结构、变质程度、主元素和微量元素的组成等方面都存在差别，是两类成因不同的基性的物质。

从变辉长岩中分离出了两类锆石<sup>①</sup>：一种为浅棕色透明半自形柱状晶体，晶棱和角顶受到熔蚀；另一类为浅黄近无色的透明自形晶体，晶棱和角顶完好。推测第一类锆石为捕获成因，第二类为辉长岩岩浆结晶成因，可以反映岩浆结晶的时间。第一类锆石测定的 3 个点呈线性分布，上交点为  $(1846.7 \pm 9.0)Ma$ ，下交点为  $(652 \pm 38)Ma$ ；第二类锆石测了两个点，第一个点  $^{206}Pb/^{238}U$  和  $^{207}Pb/^{235}U$  的表面年龄分别为 270.4 Ma 和 273.2 Ma；第二个点  $^{206}Pb/^{238}U$  和  $^{207}Pb/^{235}U$  的表面年龄分别为 205.9 Ma 和 205.1 Ma，这类锆石的年龄是所有明港捕虏体所测年龄中的最低者（有关捕虏体年龄测定的详细资料将有另文发表）。本文认为变辉长岩很可能是秦岭碰撞造山阶段基性岩浆的底侵产物，岩石中普遍出现的石榴石冠状体是在岩浆底侵到地壳后岩浆冷却降温过程中形成的。在剖面上它位于地壳的最底部。

### 1.5 滑石化橄榄岩为南秦岭俯冲岩片之上的楔形地幔

明港出露的捕虏体橄榄岩最重要的特点是：(1) 岩石受到强烈的蚀变，蚀变的类型不同于常见地幔橄榄岩的蛇纹石化；(2) 后期的交代作用十分普遍，以出现隙间云母为主；(3) 岩石的塑性变形显著；(4) 富集 LREE、Pb、Ba、U 等元素，特征与松树沟蛇绿岩中的地幔橄榄岩不同<sup>[15]</sup>。笔者认为滑石化的橄榄岩捕虏体属于华北地块，经历的深部过程是：拆离了的南秦岭下地壳进入华北块体后，其中的酸性麻粒岩释放出富 Si、K 的流体交代了上覆的楔形地幔，导致橄榄岩发生滑石化、云母化，并富含壳源的不相容元素。这样不仅很好地解释了橄榄岩的岩石地球化学特征，而且也解释了为什么寄主岩起源于下地壳却

能携带地幔的橄榄岩物质到达地表。

### 1.6 南秦岭俯冲岩片下地壳剖面及拆离俯冲模型

由上述资料和对分析表明，明港地区虽然位于北秦岭与华北块体的交界处，但火山角砾岩所携带的下地壳捕虏体是南秦岭的样品，橄榄岩为华北楔形地幔的组成，因此明港地区下地壳深源捕虏体所恢复的剖面就是南秦岭的下地壳剖面。南秦岭俯冲岩片下地壳组成的示意剖面见图 5。图中地壳厚度是依据计算的基性麻粒岩平衡压力获得的，变辉长岩表示为底侵产状，位于现今地壳的最底部。拆离俯冲模型见图 6。图中显示了南秦岭在向北俯冲时发生拆离，地壳的上部垫置于北秦岭之下，这一结论已经由前人的工作所证实<sup>[17]</sup>，地壳的下部则继续向北俯冲至华北块体下部，华北块体呈楔状插入秦岭造山带。

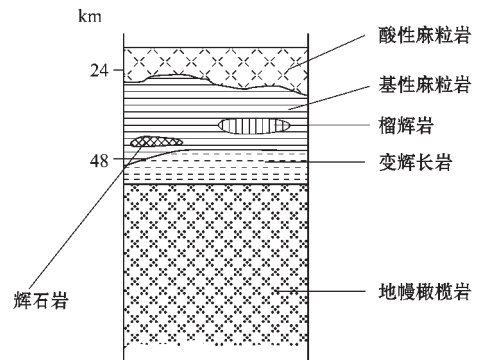


图 5 南秦岭俯冲岩片下地壳柱状剖面

Fig. 5 Column of the South Qinling subducting slab

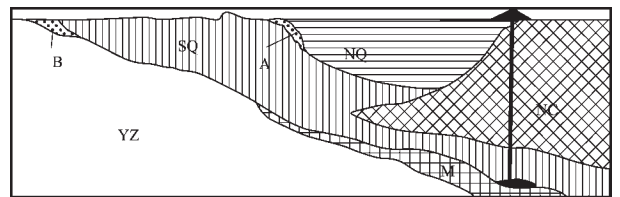


图 6 南秦岭拆离俯冲示意图

NC—华北块体；NQ—北秦岭；SQ—南秦岭；M—南秦岭地幔；YZ—扬子块体；A—松树沟蛇绿岩；B—勉略蛇绿岩

Fig. 6 Diagram showing detachment-subduction of the South Qinling

NC—Huabei block；NQ—North Qinling；SQ—South Qinling；M—South Qinling mantle；Yz—Yangtze block；A—Songshugou ophiolite；B—Mianlue ophiolite

① 胡宝群. 信阳深源包体的地质地球化学特征及其岩石圈模型. 中国地质大学(武汉), 2001.

## 2 与邻区的对比——苏鲁地区的岩石圈模型

吴其反<sup>[18]</sup>通过对新编 1:100 万航磁资料处理和三维反演后,发现在苏鲁地区地壳深部 20~25 km 处存在一规模巨大的北西方向分布的强磁性体,该磁性体从华北凹陷及鲁西一带一直延伸到苏北—南黄海凹陷,直达扬子地块地壳深部。磁性体视磁化率为  $1400 \times 10^{-5} \text{SI}$ ,与鲁西出露的泰山群变质岩磁性(约为  $1270 \times 10^{-5} \text{SI}$ )相当,据此推测该磁性体为华北太古宙变质岩系的残留体。

目前普遍认为烟台—五莲断裂带是华北与苏鲁的碰撞缝合带,然而上述磁性体的发现表明在烟台—五莲断裂带以南大约中地壳以下的位置仍有华北块体的地壳物质存在,因此该断裂应该是它们在地壳上部的界限。根据磁性体分布的范围及南京附近存在一条近东西向的隐伏断裂,原作者认为这条断裂是华北块体南缘的地壳深部边界,华北块体呈“鳄鱼咀”状楔入到秦岭块体。在苏鲁地区北秦岭已经尖灭,南秦岭相当于扬子块体的大陆边缘,因此也

可以表达为华北块体楔入到扬子块体中。经简化原作者提出的模型见图 7。该模型同样显示了南秦岭向北的拆离俯冲作用,拆离面大约与磁性体的顶面(20~25 km)相当。

## 3 讨论与结论

(1)依据本文提供的最新资料进一步证实,明港地区火山岩携带的下地壳捕虏体为南秦岭下地壳的物质,滑石化橄榄岩属于华北块体插入秦岭造山带的楔形地幔样品;

(2)南秦岭在古生代末(273~205 Ma)发生过基性岩浆的底侵作用,代表性的样品为变辉长岩,岩浆是在高压和降温的条件下结晶的;

(3)秦岭造山带总体的岩石圈模型为:南秦岭(扬子块体)向北拆离俯冲,北秦岭地壳向华北仰冲,华北岩石圈呈楔状插入秦岭造山带;

(4)根据苏鲁地区的拆离俯冲模型推测,明港地区南秦岭拆离面位于中、下地壳之间的可能性较大,即南秦岭的中地壳垫置于北秦岭之下,并成为晚古生代—早中生代花岗岩的源区。这与现今秦岭中地壳存在低速带的事实相吻合;

(5)秦岭碰撞造山及南秦岭向北俯冲的影响范围有多大?是地质界所关注的热点问题。据地球化学研究推测,合肥盆地内部古新世拉斑玄武岩的源区是早中生代扬子板块向华北板块俯冲形成的“地幔楔”部分熔融的产物<sup>[19]</sup>,因此俯冲影响的范围延伸到了合肥盆地,距秦岭北界约 70 km。最新的资料报道<sup>[20]</sup>在鲁西南—苏北发育有侏罗纪岩浆活动,侵位年龄为 188~191 Ma。岩性为角闪闪长岩—闪长岩—二长闪长岩—二长斑岩,其中发现了榴辉岩类捕虏体,该岩体群距秦岭北界约 400 km。如果这些榴辉岩捕虏体属于南秦岭向北俯冲而不是苏鲁向西俯冲的物质组成,那么秦岭碰撞造山的深部影响要比原先估计的大很多,这一结论尚需更多的资料证实。

恢复造山带岩石圈组成结构时,不仅要对所获得的样品进行岩石学研究和温、压计算,以了解它们在深部的位置;而且应对样品进行详细的岩石地球化学研究,以获得它们的块体归属并揭示造山带内部构造岩片叠置、交叉的复杂图像以及块体相互作用的关系,努力使得所

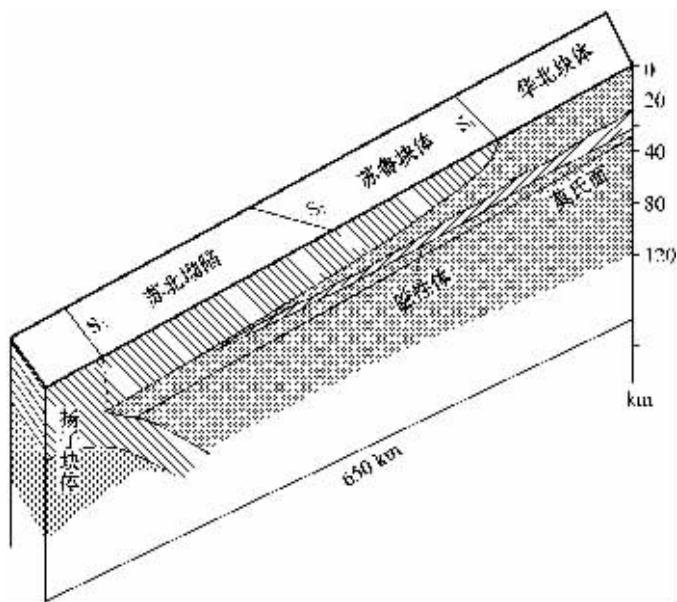


图 7 苏鲁地区南秦岭(扬子块体)

向北的拆离俯冲模型(据吴其反等<sup>[18]</sup>,简化)

S<sub>1</sub>—烟台—五莲断裂;S<sub>2</sub>—嘉山—响水断裂;S<sub>3</sub>—南京附近的隐伏断裂

Fig. 7 Model of northward detachment and subduction of the South Qinling (Yangtze block) in the Sulu area

S<sub>1</sub>—Yantai—Wulian fault; S<sub>2</sub>—Jiashan—Xiangshui fault;

S<sub>3</sub>—Hidden fault near Nanjing

恢复的岩石圈结构更接近实际。

### 参考文献 (References):

- [1] 崔军文.青藏高原造山复合体岩石圈组构[A].见:曹佑功主编:全球构造带超大陆的形成与裂解(第30届国际地质大会论文集,第6集)[C].北京:地质出版社,1996.  
Cui Junwen. Lithosphere structure of orogenic complex in Qinghai-Xizang plateau[A]. In: Chao Yougong (ed.), Super-continent Formation and Breakup of Global Tectonic Belt. 30th IGC Proceeding Vol.6[C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese).
- [2] 钟大赉,等.滇川西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998.231.  
Zhong Dalai, et al. Paleo-Tethyan Orogenic Belt of Western Yunnan-Sichuan [M]. Beijing: Science Press. 1998, 231 (in Chinese).
- [3] 从柏林,王清晨.大别山—苏鲁高压变质带研究的最新进展[J].科学通报,1999,44:1127~1141.  
Cong Bolin, Wang Qingchen. The Dabai-Sulu UHP rocks belt: Review and respect [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44:1127~1141 (in Chinese).
- [4] 王清晨.中国超高压变质岩十五年研究进展[J].地球学报,2001,22(1):11~16.  
Wang Qingchen. Development of studying Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks from China during the past 15 years [J]. Acta Geosciencia Sinica, 2001, 22 (1):11~16 (in Chinese with English abstract).
- [5] 杨文采,胡振远,程振炎,等.郟城—涟水综合地球物理剖面[J].地球物理学报,1999,42(2):206~217.  
Yang Wencai, Hu Zhenyuan, Cheng Zhenyan, et al. Long profile of geophysical investigation from Tanchen to Lianshui, East-central China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1999, 42(2): 206~217 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张国伟,梅志超,周鼎武,等.秦岭造山带的形成与演化[A].见:秦岭造山带的形成及其演化[C].西安:西北大学出版社,1988.1~16.  
Zhang Guowei, Mei Zhichao, Zhou Dingwu, et al. Formation and evaluation of Qinling orogenic belt[A]. In: Formation and Evaluation of Qinling Orogenic Belt[C]. Xian: Northwest University Press. 1988 (in Chinese).
- [7] 曹家敏,朱介寿,吴德超.东秦岭地区的地壳速度结构[J].成都理工大学学报,1994,21:11~17.  
Cao Jiamin, Zhu Jieshou, Wu Dechao. Velocity structure of the crust in Eastern Qinling Mountain[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1993, 21:11~17 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张国伟,张本仁,袁学诚,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社,2001.855.  
Zhang Guiwei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing, Science Press, 2001 (in Chinese).
- [9] 杨文采,程振炎,陈国九,等.苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(1)——深反射地震[J].地球物理学报,1999,42(1):41~52.  
Yang Wencai, Cheng Zhenyan, Chen Guojiu, et al. Geophysical investigations in northern Sulu UHPM belt, Part I: Deep seismic reflection[J]. Acta Geophysica Sinica, 1999, 42(1):16~27 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨文采,方慧,程振炎,等.苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(II)——非地震方法[J].地球物理学报,1999,42(4):508~519.  
Yang Wencai, Fang hui, Cheng Zhenyan, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM terrane in East China (II): Non-seismic methods[J]. Acta Geophysica Sinica, 1999, 42(4):508~519 (in Chinese with English abstract).
- [11] 袁学诚,任纪舜,徐明才,等.东秦岭邓县—南漳反射地震剖面及其构造意义[J].中国地质,2002,29(1):14~19.  
Yuan Xuecheng, Ren Jishun, Xu Mingcai, et al. Reflection Seismic profile from Gengxian to Nanzhang, Eastern Qinling and its tectonic implication[J]. Geology in China, 2002,29(1): 14~19 (in Chinese with English abstract).
- [12] 董颀珍.秦巴地区QB1测线地震测深成果介绍[A].见:袁学诚主编:阿尔泰—台湾地学断面论文集[C].武汉:中国地质大学出版社,1997.165~175.  
Dong Yizhen. Seismic Sounding Along QB-1 Measuring Line of Qinling-Dabashan Area[A]. In: Yuan Xuecheng (ed.) Memoirs of the Geoscience Transect for the Continental Lithosphere Beneath Altay-Taiwan, China[C]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1997 (in Chinese).
- [13] 袁学诚,徐明才,唐文榜,等.东秦岭陆壳反射地震剖面[J].地球物理学报,1994,37(4):749~758.  
Yuan Xuecheng, Xu Mingcai, Tang Wenbang, et al. Reflection seismic profile of continental crust in Eastern Qinling[J]. Acta Geophysica Sinica 1994,37 (4):749~758 (in Chinese with English abstract).
- [14] Derek Blundell, Roy Freeman, Stephan Mueller (eds.). A Continent Revealed: The European Geotraverse [M]. London: Cambridge University Press, 1992.
- [15] 路凤香,王春阳,郑建平,等.秦岭北界岩石圈组成及结构——河南明港地区深源捕虏体研究[J].中国科学(D辑),2003,33(1):1~9.  
Lu Fengxiang, Wang Chunyang, Zheng Jianping, et al. Lithospheric composition and structure beneath the northern margin of the Qinling orogenic belt—study on deep-seated xenoliths in Minggang region of Henan Province [J]. Science in China (Series D) 2003, 33(1):1~9 (in Chinese).
- [16] Zheng Jianping, Sun Min, Lu Fengxiang, et al. Garnet-bearing granulite facies rock xenoliths from Late Mesozoic volcanoclastic breccia[J]. Xinyang, Henan Province. Acta Geologica Sinica. 2001, 75(4):445~451.
- [17] 张本仁,等.秦岭造山带地球化学[M].北京:科学出版社,2002.187.  
Zhang Benren, et al. Geochemistry of Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing, Science Press, 2002.187 (in Chinese).
- [18] 吴其反,路凤香,刘庆生,等.苏鲁地区地壳深部太古代残留岩片:来自航磁资料的证据[J].科学通报,2003,(4):395~399.  
Wu Qifan, Lu Fengxiang, Liu Qingsheng, et al. An Archean plate existed at lower crust in sulu area: The evience from magnetic data

- [19] 从柏林,王清晨,张海政,等.中国合肥盆地新生代火山岩成因岩石学研究[J].岩石学报,1996,12(3):370~381.  
 Cong Bolin, Wang Qingchen, Zhang Haizheng, et al. Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in Hefei basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12(3):370~381 (in Chinese with English abstract).

- [20] 许文良,王冬艳,刘晓春,等.徐淮地区早侏罗世侵入杂岩体中榴辉岩类包体的发现及其意义[J].科学通报,2002,47(8):618~622.  
 Xu Wenliang, Wang Dongyan, Liu Xiaochun, et al. Discovery of eclogite xenolith in Early Jurassic complex in Xu-Huai area and geological significant[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 47(8): 618~622 (in Chinese).

## Structure of the lower crust and detachment and subduction of the lithosphere of the South Qinling

LU Feng-xiang<sup>1</sup>, WANG Chun-yang<sup>1</sup>, HU Bao-qun<sup>2</sup>, WU Qi-fan<sup>3,4</sup>, ZHENG Jian-ping<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. East China Institute of Technology, Wuzhou 344000, Jiangxi, China;

3. Department of Engineering Physics, Qinghua University, Beijing 100084, China;

4. Airborne Geophysical Exploration and Remote Sensing Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the lead isotopic composition and geochemical study of rocks, this paper further verifies that the xenoliths of the lower crust carried by an Early Mesozoic andesite-basaltic breccia pipe developed in the Minggang area on the northern boundary of the North Qinling belong to the South Qinling. From below upward the reconstructed section of the lower crust below the South Qinling consists of underplating gabbro, basic granulite (which contains lenses of granulite and gabbro) and acid granulite. The general lithosphere model of the Qinling orogenic belt is as follows: the South Qinling crust (Yangtze block) is detached and subducted northward, the North Qinling crust is obducted toward North China, and the lithosphere beneath North China is injected as a wedge into the Qinling orogenic belt, with the detachment surface lying between the middle and lower crusts. In a plan view, the subducting slab of the South Qinling possibly extends 400 km until it reaches here.

**Key words:** lower crust; lead isotopic composition; lithosphere; detachment-subduction