地 质 科 学
2003 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF GEOLOGY 38(2):137—154

秦岭勉(县-)略(阳)缝合带及南秦岭地块的变质动力学研究*

李三忠[1] 赖绍聪[2] 张国伟[2] 李亚林[3] 程顺有[2]

(1.中国海洋大学海洋地球科学学院 青岛 266003;
2.西北大学地质系 西安 710069;3.成都理工学院 成都 610059)

摘 要 将变质地质学与构造地质学的研究相结合,将造山过程与变质演化相结合,系统研究了勉(县-)略(阳)缝合带的康县—高川段变质动力学特征及其与佛坪递增变质带的关系,认为该区变质作用时空演化特征表现为:不同构造环境同时出现不同类型的变质(如俯冲、拉张等),同一地带不同时期或阶段变质类型的叠加(如俯冲与碰撞),不同地段具差异抬升的历史等特征,从而导致变质类型在空间上的复杂性。这一结果也表明勉略带是一复杂的蛇绿构造混杂岩带,其内部不同的一系列构造岩片早期曾有不同的变质演化历史,后期经历了相似的变质叠加,最后在构造作用下差异抬升。该区变质作用演化可细分为 4 个阶段:主体发生于海西期并延续至印支早期的拉张变质作用阶段,晚海西—印支期俯冲变质作用阶段,印支晚期碰撞变质作用阶段和印支末期的热接触变质作用和动力退变质作用阶段。勉略缝合带康县—高川段不同岩片及佛坪递增变质带的 PTt 轨迹研究,揭示了它们不同的变质动力学演化及俯冲、碰撞、拆沉的构造演化过程和机制,也反映了缝合带是由不同层次、起源和环境的岩石经构造作用混杂而成,并经历了后期差异隆升剥蚀历史。

关键词 勉(县-)略(阳)带 变质动力学 构造演化 PTt 轨迹

1 区域背景

研究区大地构造单元自北而南分为:华北板块、商县—丹凤缝合带(简称为商丹带)、南秦岭地块、勉县—略阳缝合带(简称为勉略带)和扬子板块(图 1)。

勉略带是新近揭示出来的秦岭造山带南部的又一巨型构造带,东自湖北随县—襄樊—房县,经陕西高川—石泉—勉县—略阳,西延至甘肃康县—文县,并与东昆仑阿尼玛卿缝合带相连,为一巨型正弦波状自北向南的逆冲推覆构造带。勉略带是近几年来备受关注的构造带之一,其中高川—康县段 (图 1)是这一缝合带的典型地段。目前,有关地球化学(Lai Shaocong and Zhang Guowei, 1996; 赖绍聪等,1997a)、火山岩大地构造学(赖绍聪等,1997b)、沉积大地构造学(孟庆任等,1996;钟建华等,1998)和同位素年代学(李曙光等,1996)等研究都取得重大进展,对造山带演化过程中的变质动力学,曾有李三忠(1998)进行过初步研究,在带内发现了一些高压低温矿物组合,并报道了勉略带内麻粒岩的发

* 国家自然科学基金重点项目(编号:49732080)及青年基金(编号:40002015)研究成果。
李三忠,男,1968 年 8 月生,博士,教授,构造地质学和变质地质学专业。
2001 - 06 - 20 收稿, 2001 - 08 - 28 改回。

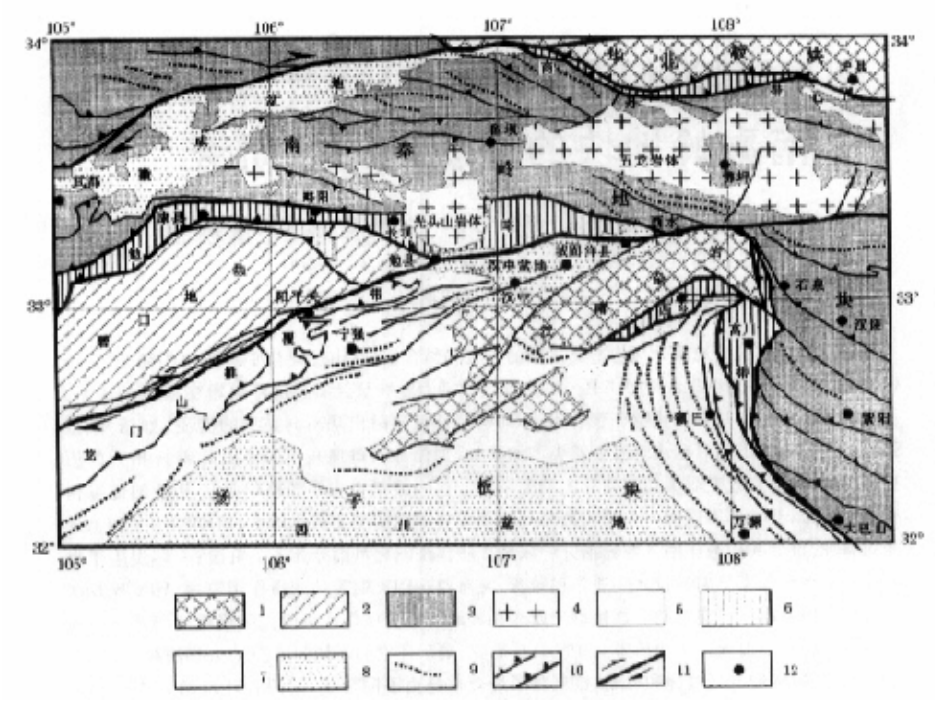


图 1 研究区大地构造单元简图

1. 华北板块及扬子板块的古老基底;2. 碧口地块;3. 南秦岭地块及西秦岭造山带东北角(徽成盆地为界);4. 花岗岩(海西—印支期未分);5. 前陆褶皱带(西为龙门山前陆,东为南大巴山前陆);6. 商丹带(北)和勉略带(南);7. 龙门山推覆带;8. 中-新生代盆地;9. 褶皱轴迹;10. 逆冲断裂带(粗线为缝合带边界断裂;细线为一般逆冲断裂);11. 走滑断层;12. 市、县或镇

Fig. 1 A simplified map showing teconic units in the studied area

现(李三忠等,2000)。

在勉略带康县—高川段以北的南秦岭地块属秦岭造山带的中间地块,其西界被斜切造山带的中-新生代徽成盆地叠置,具有华北型太古-下元古界的结晶基底(如构成佛坪穹隆核心的佛坪杂岩等)和扬子型中-上元古界过渡基底(如耀岭河群等),早古生代该区属扬子板块的北部被动陆缘,泥盆纪早期因勉略小洋盆的打开而游离成为独立的构造单元,同时其北部沿商丹带与华北板块碰撞,因而,晚古生代总体为南张北压的构造格局(张国伟等,1996)。该区南秦岭地块有两个独特的地质现象,即以佛坪穹隆构造为核心的独特的佛坪递增变质带和印支期花岗岩带(图版Ⅰ)。针对这两个现象,谢茂祥等(1987)①研究了北部低压变质相带及佛坪递增变质带,认为是双变质带。许志琴等(1988)在该低压变质相带的石榴石二云石英片岩中获得黑云母、白云母等 K-Ar 法表面年龄为

① 谢茂祥,孙民生.1987.南秦岭华力西期中压和低压区域变质作用.秦岭区测,(1):40-54.

313～267 Ma。张宏飞等(1996)对该区东江口岩体群(同位素定年为200～217 Ma)、五龙岩体及光头山岩体(同位素定年为200 Ma)(图1及图版Ⅰ)等的Sm-Nd同位素示踪研究,表明其岩浆源区为新元古代增生的地壳物质,在物质组成和时代上可能类似于耀岭河群基性火山岩;王居里(1997)提出五龙岩体为壳幔混源成因并认为与佛坪递增变质带的形成有关;魏春景等(1998)在佛坪穹隆中发现海西期低压麻粒岩;翟刚毅(2000)对佛坪递增变质带的研究也深化了对该区的认识。

在勉略带康县—高川段以南的扬子板块,自西而东包括碧口地块、龙门山推覆带、龙门山前陆褶皱冲断带、汉南杂岩(或汉南地块)、大巴山前陆褶皱冲断带,以及南部的四川盆地和北缘叠置的中-新生代汉中盆地。该区扬子板块未受到佛坪递增变质带的影响,而且,属于勉略带组成的西乡岩片(图1中西乡周围)变质极浅或未变质,被移置到汉南杂岩之上。

问题在于:勉略带内部的高压低温变质与扬子板块上极浅或未变质的特征和南秦岭地块中佛坪递增变质带特征差异太大,这是在一种什么样的动力学背景下发生的,扬子板块上极浅或未变质的特征和南秦岭地块中佛坪递增变质带与勉略带的演化有何关系。本文拟从变质动力学角度对其进行剖析,围绕勉略带及上述邻区的变质动力学演化这一关键科学问题进行研究,对不同的构造—岩石单元或构造岩片进行变质作用和PTt轨迹研究,并通过变斑晶或基质的微构造这一桥梁探讨变质与变形关系;最后提出该区变质动力学的构造解释模型。

2　南秦岭地块的变质特征

南秦岭地块变质作用既有早前寒武纪结晶基底($Ar\text{-}Pt_1$)变质和晋宁期变质($Pt_{2\text{-}3}$),又有属同一阶段的海西—印支期变质(但仍可分为几个亚阶段,且有不同类型变质作用并发或叠加)。中-新生代主要是部分侏罗系-下白垩统地层有轻微变质,其后无变质作用发生。变质类型及变质程度在空间上极其复杂。总体上,海西—印支期变质空间上可分为两带:北部低压变质相带和南部佛坪递增变质带。

(1)北部低压变质相带

从早期变形面理矿物组合分析,整个南秦岭地块内的泥盆-石炭系在早期变形期间,变质程度普遍不高,属低绿片岩相变质。但在丹凤—商南一带(除去武关岩群外),自南往北由低绿片岩相—高绿片岩相—低角闪岩相渐变,矿物共生组合分别为:绿泥石+绿帘石+石英+绢云母,黑云母+方柱石+绿泥石,角闪石+黑云母等,但都属低压相系。由于:1)热递增变质中心并不靠近印支期岩体,2)黑云母角页岩及方柱石角岩呈区域展布和3)在火神庙—过风楼递增变质带的石榴石二云石英片岩中获得黑云母、白云母等K-Ar法表面年龄为313～267 Ma(许志琴等,1988)。故该阶段变质可能划归海西—印支期变质的早期阶段。

在凤县—柞水一带发育的低压相系属布羌式变质带(图版Ⅰ),西起凤县,东经江口、旬阳坝、柞水,至山阳、过风楼一带。发育有典型的低压矿物红柱石和堇青石,它们呈区域性展布,据矿物组合可分为绢云母—红柱石带、黑云母—红柱石带、十字石—红柱石带和红柱石—堇青石带(谢茂祥等,见前脚注)。

绢云母—红柱石带分布于红岩河—王家楞以西地区，在凤县银母寺一带，矿物组合以 Chl(绿泥石) + Ser(绢云母)为主，有时有黑云母，向西至凤县已全部为 Chl + Ser 组合，王家楞一带有 And(红柱石) + Ser + Q(石英)组合。黑云母—红柱石带分布于红岩河—王家楞以东到黄柏塬一带，主要矿物组合为：And + Bt(黑云母) + Mus(白云母) + Pl(或 Chl) + Q。十字石—红柱石带分布于黄柏塬—旬阳坝一带，矿物组合有：And + Stau(十字石) + Alm(石榴石) + Bt + Q，And + Chtd(硬绿泥石) + Ser + Q 及 Stau + Chtd + Mus + Bt + Q，以红柱石和黑云母共生为主要现象。旬阳坝一带十字石与红柱石共生可能为低压向中压递增变质转换期间的产物，并可见十字石内的硬绿泥石假象。红柱石—堇青石带主要分布于旬阳坝—柞水红岩寺一带，矿物共生组合有：Cord(堇青石) + And + Stau + Alm + Bt + Q，Stau + And + Alm + Bt + Mus + Q，Stau + And + Bt + Mus + Pl + Q。显微结构表明，在后两个变质带中有部分印支期碰撞期间变质带内 Stau 和 Alm 的叠加。上述低压相系变质带向西可延伸入秦岭，唯变质程度较浅，并被归并为海西期(董申保，1986；Dong Shengbao et al.，1996)。南秦岭地块自武当—安康—略阳北部一带分布有寒武-奥陶系、志留系，甚至过渡型基底。本文主要涉及志留系组成的白水江岩片和震旦-奥陶系组成的洞河岩片(图版Ⅱ)。这两个岩片在海西期可能处于中-浅部地壳层次，因为在盖层中区域性片理 S_1 的变质矿物组合为 Mus + Bt + Pl + Q，据 Mus-Bt 对温压计及白云母压力计计算(李三忠，1998)，表明约在 10～15 km 深处，但低压变质特征不明显。同整个南秦岭地块一样，这两个岩片在晚古生代早期经历了伸展变形(宋鸿林，1994)。胡健民(1998)对该区震旦系中拆离带岩石的白云母进行了年代测定，获得 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄为 261 ± 0.25 Ma 和 282.7 ± 8 Ma，及 260.45 ± 2.4 Ma 的等时线年龄，表明为海西期伸展，变质作用与前述低压相系变质同时。

(2)南部佛坪递增变质带

佛坪递增变质带分布区岩石包括下元古界构成的佛坪基底杂岩及震旦-石炭系组成的盖层变质岩系。佛坪递增变质带具有以下最显著的特点。1)宏观上，围绕佛坪基底杂岩发育中心式递增变质带，由内向外依次为夕线石带—十字石蓝晶石带—石榴石带—黑云母带，至金鸡岭一带部分地层未变质。2)在勉县至洋县一带，可见该递增变质带交切勉略带，且变质带界线不超越勉略带南界断裂。3)宏观上，佛坪递增变质带变质程度不受地层层位和埋深控制。4)递增变质带不受褶皱或断裂等构造线影响。5)光头山岩体(200 Ma)、东江口岩体群的侵入，破坏了递增变质带的完整性。6)不同变质带内的矿物显微构造研究表明，黑云母存在多个世代，有平行片理或折劈理的，也有晚期无规则分布的，说明变质带早期是同运动的；但高级变质带中的石榴石、十字石、蓝晶石和夕线石的显微构造特征表明为构造后的。因而，递增变质带的最终定型应在宏观构造变形之后，这与宏观特征一致。7)变质峰期晚于变形峰期。8)变质作用属中压型，夕线石带温度在 580～730 ℃，压力为 0.5～0.67 GPa(张国伟等，2001)，核部达麻粒岩相变质。据二辉石地质温度计算表明，平衡温度为 770～780 ℃，又据单斜辉石—斜长石—石英组合的地质压力计得到压力为 0.6 GPa(魏春景等，1998)，属中-低压麻粒岩，形成层次相对前者较深。9)在佛坪穹隆内也存在海西—印支期早期变质作用(图版Ⅰ)，早期盖层中出现构成片理的变质矿物共生组合为：阳起石 + 钠长石 + 绿泥石 + 石英(陈家义等，1997)，为低压相组合。由于构造作用快于热松弛，故早期变质矿物组合现今在佛坪热递增变质带中呈非平

衡状态与晚期角闪石 + 斜长石 + 绿帘石 + 石英等矿物组合共存。

佛坪递增变质带形成的年代学研究表明,佛坪递增变质带的变质时限持续较长。魏春景等(1998)在佛坪县城南约 500 m 一带(图 1),发现中-酸性麻粒岩为主、其中含有少量(约 10%)的基性麻粒岩和透辉斜长角闪岩的条带和透镜体,以及一些花岗伟晶岩脉。麻粒岩中的片麻理和条带产状与周围围岩一致。近来,测得该麻粒岩 Sm-Nd 等时线年龄为 200 ~ 240 Ma(张国伟等,2001)。形成于变质峰期的锆石 U-Pb 同位素年龄为 212.8 ± 9.4 Ma,变质峰期温度为 740 ~ 780 ℃,故该年龄应当反映为变质峰期年龄。此外,杨崇辉等(1999)获得佛坪县城附近的混合片麻岩中的锆石 U-Pb 年龄 197 ~ 200 Ma 和 271 ± 15 ~ 221.4 ± 36 Ma,该片麻岩 Sm-Nd 等时线年龄为 196 Ma(张国伟等,2001)。马道—神河的递增变质带内(佛坪递增变质带组成)获 4 个 K-Ar 法同位素表面年龄样品作等时线处理后的年龄为 251.61 Ma。变斑晶微构造特征指示宏观上佛坪递增变质带交切俯冲带,明显表明该递增变质带应晚于 221 ~ 241 Ma 的俯冲带变质(李曙光等,1996)。因此,无论从微构造还是同位素年龄测定,都反映其主期变质时限持续较长,应是海西—印支期。尽管金鸡岭一带(图版 I 东部)二叠-三叠系为未变质地层,按照现代变质地质学理论,这不足以证明本区海西期和印支期变质不是一个连续变质事件。本文赞同海西—印支期变质作用是连续的,可划分为若干阶段。晚期阶段对早期阶段变质具改造叠加性,这不仅反映在微构造特征上,在同位素系统热扰动上也有反映。

(3)热接触变质特征

紧邻略阳—勉县的南秦岭地块南部发育的新院、迷坝、张家坝、姜家坪和姊妹山等岩体(图 1 中光头山岩体西部的一系列小岩体),其 U-Pb 同位素年龄为 220 ~ 205 Ma,K-Ar 法同位素年龄界于 243.8 Ma 至 206.4 Ma 之间,在其周边可见明显的接触变质带,热接触变质带宽约 0.7 ~ 1.0 km,主要接触变质岩有长英质角岩、黑云母角岩、堇青石角岩、红柱石片岩和粗粒大理岩等。这些变质带切穿递增变质带,表明这些岩体及接触变质带形成都要晚。根据这些岩体的年代,表明该热接触变质作用发生于印支末期。

3　勉略带康县—高川段的变质特征

勉略带的组成复杂,由不同类型、不同构造环境、不同时代和不同变质程度的岩片组成。卷入俯冲带中的不同时代的岩石类型很多,根据目前变质相带在空间上保存不同,总体上可以勉县长坝、东经 108°或酉水为界,分为东部、中部和西部。

西部表现为低绿片岩相—蓝片岩相的变质作用,低温高压变质成因的矿物保存相对较多;中部高压变质相带被佛坪递增变质带叠加改造,但仍有保存。前人发现的蓝闪石(类)(陶洪祥等,1993)、3T 型多硅白云母(李映琴,1991;李三忠,1998)、黑硬绿泥石及钠云母(李三忠,1998)等高压矿物也主要分布于中、西部,如康县琵琶寺、勉县雷公山、洋县八宝台、略阳华厂沟、三岔子和勉县雷公山等地。东部以绿片岩相—低角闪岩相变质作用为主,高压变质相带的矿物组合保存较少。这为探讨勉略带不同阶段、不同空间的构造演化提供了条件。

(1)西部变质特征

西部各岩片总体变质程度为蓝片岩相—低绿片岩相,高压变质矿物相对保存较好,

主要矿物组合有:多硅白云母 + 黑硬绿泥石 + 绿泥石 + 钠长石 + 石英。多硅白云母及黑硬绿泥石皆有 2 个世代,且平行于片理和折劈理分布。李曙光等(1996)对该区黑沟峡—庄科岩片的同变形期形成的绿泥钠长千枚岩进行了定年,获得 Sm-Nd 全岩等时线年龄为 241 ± 21 Ma, Rb-Sr 全岩等时线年龄为 221 ± 13 Ma,并认为是变质年龄。三岔子绿泥多硅白云母钠长石英片岩(千枚岩)由代表浅变质的岛弧火山岩组成。但三岔子变辉长岩由代表洋壳下部或可能的洋幔顶部组成,因为在三岔子地区出露的蛇纹岩与变质辉长岩紧密伴生,地球化学研究揭示出属古洋幔组成(许继峰等,1997; Lai Shaocong and Zhang Guowei,1996),变质超基性岩的岩相学研究及原岩恢复表明为方辉橄榄岩、纯橄岩、含辉橄榄岩和二辉橄榄岩等,已强烈蛇纹石化。附近发育滑石菱镁片岩(杨永成等,1996)。显微组构分析表明,在俯冲变形期间,三岔子基性—超基性岩块相对岛弧火山岩岩片处于较深构造层次。值得指出的是:该变质辉长岩中有变质成因的 2 个世代角闪石,第 1 世代的角闪石呈辉石假象,具有环带,形成于变形前,并被变形改造,总体平行片理分布,对其进行研究可揭示深层次辉长岩就位历史及其与浅层次岩片的并置过程;第 2 世代的角闪石自形,平行折劈理分布。

(2)中部变质特征

相对三岔子地区而言,中部的长坝—雷公山—菜马河一带的勉略带整体变质程度略高。变质变形显微组构分析表明,该区发现的十字石、蓝晶石和石榴石皆属构造后生长的,并成为佛坪递增变质带的组成部分。它们主要是碰撞后递进变质叠加的结果,即:该区变质程度较西部高,且与递增变质带的叠加有关。本次选择了该区不同的代表性岛弧型岩片进行 PTt 轨迹的研究。长坝西绿泥钠长绢云千枚岩、长坝石榴斜长角闪岩、雷公山石榴角闪绢云千枚岩、安子山石榴斜长角闪岩及菜马河基性麻粒岩分别代表低级、高-中级、中级、中-高级及高级变质的岛弧火山岩组成(地点详见文献"李三忠等,2000"中的图 1 及图版Ⅱ中箭头所指)。其峰期前的变质矿物残余在基质中有绿泥石及黑硬绿泥石等(两河口—雷公山),局部有蓝片岩残存,平行折劈理还有温度略高背景下形成的高压钠云母(雷公山)和方柱石(菜马河)。在石榴石变斑晶内的早期包体也能反映其经历了早期的进变质历史。

(3)东部变质特征

该区勉略带内岩石分布范围较窄,主要有寒武-三叠系及少量火山岩,变质程度极不均一,其中石炭-三叠系遭受轻微变质,主要为一些钙质板岩、千枚岩和变质硅质岩等,破劈理发育,其中高川岩片(图 1 中高川周边)变形极强,但特征变质矿物极少。分布于西乡一带的西乡岩片变质也极浅,其中三郎铺组甚至未变质。为研究该区变质动力学特征,本次选择了其北侧紧邻的南秦岭地块中的白水江岩片和洞河岩片(图版Ⅱ右侧)研究 PTt 轨迹特征。这两个岩片中的地层有绿片岩相矿物组合,亦有角闪岩相矿物组合。酉水街北 1 km 处的十字石榴二云片岩属白水江岩片,石泉饶峰乡的(绿泥)十字石榴黑云片岩和十字石榴二云片岩则属洞河岩片组成。

4 PTt 轨迹特征

为了揭示勉略带康县—高川段与其北的南秦岭地块间在印支期构造演化时的关系,

有选择地对典型地质体(岩片或地块)进行了 PTt 轨迹的研究。缝合带是由变质程度不一,变形过程、变质历史和抬升过程都存有极大差异的复杂岩片(块)组成,因而要用一条 PTt 轨迹来反映其历史便歪曲了事实,而且也难以区分不同 PT 点反映的是同一地质事件的不同阶段还是两个甚至多个无关的地质事件的变质条件。详细的构造学研究表明勉略带中的 S_1 片理及 S_2 折劈理的形成基本具同时性,而且,同位素年代学界定其变质期都为海西—印支期。结合岩石学和岩相学观察,将各个阶段不同岩片或岩块内形成的矿物共生组合放在同一时间轴上进行对比,从而确立缝合带内不同岩片的俯冲、抬升和剥露的不同历史及相互关系。

4.1　缝合带内 PTt 轨迹及意义

为了真实反映俯冲作用的变质过程与构造变形过程的关系,选择蛇绿岩套中的洋壳或洋幔组成岩类、岛弧组成的岩类进行研究更为准确、合理。因此,根据勉略带中残存岩石,选择了变质辉长岩、石榴斜长角闪岩、斜长角闪岩和绿泥绢云钠长千枚岩等作为代表。它们都经历了强烈的片理化变形,变质程度不一,从蓝闪片岩相至麻粒岩相不等。

(1)西部三岔子岩片中的岛弧火山岩及辉长岩

采用 Triboulet and Audren 的角闪石环带来反演 P-T-t-d 轨迹的约束方法(李三忠,1998),获取本区变质辉长岩的 PTt 轨迹为顺时针。对岛弧火山岩变质成的含黑硬绿泥石的多硅白云母绢云钠长千枚岩的研究,也获得一顺时针 PTt 轨迹,其峰值温度低于中部和东部,但峰值压力高于东部(图版Ⅱ)。显微组构分析表明,变质辉长岩的早期变质阶段早于岛弧火山岩的早期变质阶段,始于变形前。前者 PTt 轨迹表明其一直处于抬升过程中,表现为两个不同阶段的降温降压过程(李三忠等,2001),早期近等温快速降压与陆壳拉开变薄、洋壳出现和洋幔抬升出露有关;后期可能与勉略洋晚期洋内消减有关,洋内板块下部俯冲热结构因下行洋壳板块的低温地质体的介入,仰冲盘的深部变辉长岩快速降温,同时仰冲使压力也急剧降低,后期变质阶段还可能与其它岩片并置后经历了共同向南的逆冲抬升降压有关。与此同时,代表俯冲带边缘岛弧型火山岩的后者,早期变质阶段首先经历的是与俯冲相关的缓慢增温快速增压过程,以多硅白云母 + 黑硬绿泥石 + 钠长石 + 石英的高压矿物组合为特征,之后才为向南的逆冲抬升导致的降温降压过程。它们于蛇绿岩仰冲之后扬子板块与南秦岭地块碰撞期间在同一构造层次并置,可能在扬子板块下行垫托隔离地幔供热的情况下得以保存,并随后经历共同的快速逆冲抬升。

总之,三岔子岩片(岩片位置见文献"李亚林等,2001"图 1 或"李三忠等,2001"图 1)是构造混杂的结果,有洋幔组成(蛇纹岩块),也有岛弧火山岩组成,是在构造肢解后拼贴在一起的。

(2)中部长坝—菜马河—安子山—雷公山地区

已分别获得了安子山(Xu Jifeng et al.,1994)、长坝、长坝西(实际属西部的岩片)、两河口—雷公山和菜马河 5 条顺时针 PTt 轨迹。它们具有一致的增温增压过程,峰值压力较东部高,达 0.9 GPa ±,其中菜马河的麻粒岩达 1.2 GPa ±(李三忠等,2000),其峰值温度或压力较东、西部都高,这与该区各岩片处于强烈收缩部位及佛坪递增变质带的十字石—蓝晶石带的叠加有关;但它们峰期后降温降压过程略有差异(图版Ⅱ),反映俯冲碰撞历

史相同,但剥露抬升历史略有差异(图版Ⅱ),即不同岩片在上升期间存在差异逆冲抬升。

(3)东部西水—石泉饶峰地区

西水街地区可建立一条顺时针 PTt 轨迹(图版Ⅱ),与中部和西部 PTt 轨迹相比,其峰值压力相对低,这可能与其处于单向地向北逆冲的逆冲带部位有关。石泉饶峰地区构筑出一条逆时针轨迹(图版Ⅱ),首先,经历了近等压升温过程,随后发生近等温升压过程,最后为降温降压过程。这一逆向轨迹可能与该区处于造山带独特的部位密切相关。在碰撞期间,西水—康县以北的南秦岭地块在陡立的勉略带和商丹带夹持下发生对冲、增厚的同时,饶峰—安康一带处于中-上部地壳的洞河岩片在略有增厚的中-上部地壳层次发生向东的侧向挤出,并可能受剪切增温或拆沉增温作用;之后,在与巴山弧形成有关的巨型逆冲推覆使其压力剧增;最后,在正常抬升过程中发生风化剥蚀。

4.2 佛坪递增变质带 PTt 轨迹及意义

佛坪递增变质带的 PTt 轨迹为一条顺时针轨迹(图版Ⅱ),首先为增压增温过程,属地壳构造增厚成因类型;到达峰值压力后,为一特殊的降压升温过程,$-\Delta P = 0.2$ GPa ±,$+\Delta T = 60$ ℃ ±,按正常造山带地温梯度 25 ℃/km 计算,隆升量应在 2 ~ 3 km ±,而实际隆升达 6 km ±。这与典型的造山带 PTt 轨迹在到达峰值温压后表现为一降温降压过程不同,Patrick and Lieberman(1988)指出这类 PTt 轨迹与岩石圈拆沉有关,且只有构造拆沉才可能导致降压幅度大于升温幅度,而且在升温的同时地壳受热而密度降低,加剧了抬升、剥蚀和降压。

5 变质动力学模式讨论

勉略带及其北的南秦岭地块变质作用时代,通过近年来同位素年代学工作及各种野外约束关系的综合分析,表明属海西—印支变质旋回(谢茂祥等,见前脚注;许志琴等,1988;李曙光等,1996;Dong Shengbao et al., 1996;魏春景等,1998)。上述的详细研究表明,变质过程可细分为以下几个阶段:主体发生于海西期并延续至印支早期的拉张变质作用阶段,晚海西—印支期俯冲变质作用阶段,印支晚期碰撞变质作用阶段,印支末期的热接触变质作用和动力退变质作用阶段。那么,这些不同的变质作用又是如何在一种构造过程下形成的呢?

5.1 海西—印支期俯冲—碰撞的空间变异与变质动力学的复杂性

从早期变质阶段 PTt 轨迹可知,三岔子一带俯冲期间的地温梯度约为 5 ~ 6 ℃/km,属"冷"俯冲带范围;而长坝—菜马河一带地温梯度约为 15 ℃/km,与"热"俯冲带的地温梯度相当;因此,洋壳俯冲期间在矿物成份中记录的当时的热不均一性表明其不同地段有着不同的岩石圈热结构。初步研究推断东部扩张较西部晚,洋壳亦较西部"热"。这种热壳俯冲有可能不利于蓝闪片岩相矿物组合的生成和保存。尽管递进变质阶段 PT 轨迹也主要依赖于俯冲速率,某种程度上也依赖于板片年龄(其内含热量和负浮力)、非俯冲板块热结构引起的热传输、板块接合带的摩擦耗热、水化和脱水反应以及流体热对流传递等(Ernst,1988),但西秦岭阿尼玛卿带俯冲速率向康县—高川段有递减趋势,除表现在南

秦岭地块上三叠纪期间盆地发育西宽东窄的情况外,在 PTt 轨迹上也同样有所显示。而且因剪刀式张裂、扩张,西部洋壳年龄也较东部老,东部可能因含热较高,导致东部温度高于西部。对于流体热对流传递,研究表明东部平行片理 S_1 及折劈理 S_2 的碳酸盐矿物较西部发育,可能 CO_2 流体对俯冲板片的干化作用,提高变质温度也有一定关系。总之,该区海西—印支期俯冲期间的热不均一性有俯冲速率、洋壳年龄和流体等的影响,这些因素反映了原始岩石圈的热结构。

三岔子地区与长坝—菜马河一带退变质阶段 PT 轨迹的明显差异也反映了物质回返的过程和机制存在差异。尽管三岔子地区尚未发现蓝片岩,但西部其它高压变质矿物组合的保存表明其折返机制可能类似于蓝片岩的折返机制。而东部明显受到同变质期后期阶段强烈的变质叠加,出现十字石 + 蓝晶石 + 石榴石 + 黑云母组合,其后期阶段变质带与南秦岭地块内佛坪递增变质带在空间上具连续性。石榴石边缘环带内还发现有十字石的包体,表明可能存在降压升温过程,对该区高压矿物组合保存不利。因此,中-东部其折返可能与碰撞作用及佛坪穹隆的隆升机制有关。另一方面也可能表明东部已碰撞隆升,西部还可能存在俯冲的剪刀式闭合过程。

勉略缝合带不同地段具有不同的变质动力学过程,涵盖大量大地构造演化信息,尤其是板块的俯冲与碰撞动力学内容更为丰富。勉略缝合带康县—高川段东、中、西部差异正是俯冲、碰撞及折返过程在空间上变异的具体体现。

5.2　拆沉模式及拆沉效应

为了解释研究区低压变质相系及递增变质带的特殊性,本文提出该区先后经历了两个阶段的拆沉作用。拆沉的直接证据来自物质成份,但拆沉效应则可提供更多的间接证据。该区第一阶段的拆沉存在的直接证据来自东江口岩体(张宏飞等,1996;朱茂旭等,1998);第二阶段的拆沉存在的直接证据来自五龙岩体成因及佛坪递增变质带的 PTt 轨迹,后者已在前文详述,五龙花岗岩的地球化学特征表现为它属壳幔岩浆混合成因(王居里,1997),而不出现白云母或二云母花岗岩的非拆沉成因花岗岩(邓晋福等,1996)。

第一阶段的拆沉发生在海西期,空间上发生在南秦岭地块的北部,拆沉体为商丹洋的俯冲板片。其拆沉效应也波及南秦岭北缘,保留了 414 ~ 299 Ma 的变质年龄记录(翟刚毅,2000)及该区低压高温变质(马少龙,1981;谢茂祥等,见前脚注)。在洋壳板块拆沉的过程中,地幔重熔,形成石英闪长质岩浆,岩浆同构造上升,进一步产生了东江口、曹坪、西岔和小河口等岩体,岩体与泥盆系呈侵入接触关系,但岩体变形极强,普遍发育与围岩区域面理一致的片麻理。朱铭(1995)获得 285 Ma 的 U-Pb 年龄;朱茂旭等(1998)也认为南秦岭普遍遭受了 280 ~ 200 Ma 的 Rb-Sr 系统的热扰动,且东江口岩体为耀岭河群重熔成因(张宏飞等,1997)。重熔岩浆上升后,或在地壳底部不断脉动式增添和堆聚;或通过底侵作用导致佛坪杂岩上升,盖层滑脱;或在壳内某一部位侵入,如佛坪周边、留坝、柞水和江口等地,引起下地壳增温或广泛"减压"重熔。这些岩浆加入中-上部地壳及地幔拉伸减薄使地温梯度异常增高,压力相对变化不大,由此,南秦岭地块北部出现低压高温递进变质作用(海西期)。由于沙河湾岩体形成于距今 213 Ma,故第一阶段拆沉结束于距今 213 Ma ± (高山等,1999),但起始时间可早到距今 414 Ma,而且拆沉的后效应可持续到距今

200 Ma。这不仅表现在南秦岭地块北缘 414～267 Ma(许志琴等,1988;翟刚毅,2000)的低压变质事件和东江口岩体持续至 200 Ma 的活动上,而且表现在沿商丹带南缘发育晚古生代早期的拉张裂陷上。

陕南海西期为多陆小洋盆格局,由于泥盆纪至石炭纪初勉略洋尚未俯冲,不可能引发弧后扩张,故南秦岭地块上此时盆地的形成也与南秦岭北部的俯冲板片拆沉有关。拆沉引发俯冲盘板块前缘抬升,应力松弛,转入拉张裂陷,如在刘岭群分布区迅速转入走滑拉分伸展体制(钟建华等,1998)。在南秦岭中带广泛出现泥盆系与寒武-奥陶系之间的平行不整合或微角度不整合;陕南安康地区广泛缺失上古生界。这些短暂的早期整体抬升,随后伸展塌陷,接受沉积,之后发生的强烈升温过程,上古生界与下伏岩层发生一致的低压变质作用,这些过程都与拆沉导致的效应一致。故上述平行不整合或微角度不整合都属拆沉引发的伸展型角度不整合或平行不整合。同时,由于南部的扩张及北部俯冲板片的拆沉,导致北部俯冲碰撞的减弱,出现软碰撞过程,碰撞效应减弱而不造山。

不同的是扬子板块北缘的四川盆地和巴山弧南侧地区,那里普遍缺失泥盆-石炭系,为海西期勉略洋盆张开期间裂谷肩部抬升与剥蚀所致。这在沉积物源地球化学特征上也有所显示,如勉略带南部的汉中—洋县小区志留-泥盆系碎屑岩 Th 含量均高于 10×10^{-6},与 Th 高背景值的佛坪杂岩隆升有关;石炭系的 Th 含量有所降低,此时勉略洋已将其与北部的源区分隔开,成为晚古生代扬子板块北缘组成(欧阳建平等,1996)。

第二阶段的拆沉发生在印支末期,时限较第一阶段短,但拆沉效应可波及燕山早期,空间上发生在南秦岭地块的深部,拆沉体实质是南秦岭地块的岩石圈地幔。为什么不是勉略洋洋壳拆沉?如果是勉略洋洋壳拆沉,那么,在汉南杂岩上应当有类似南秦岭地块北部出现的低压高温变质叠加,而实际地质情况是勉略带南部的扬子板块上印支期变质作用极弱,且佛坪递增变质带不逾越勉略带南界。南秦岭地块的岩石圈地幔因壳幔脱耦发生拆沉作用,由于佛坪麻粒岩达温度峰期的年龄为距今 212 Ma(张国伟等,2001),故这阶段拆沉起始时间在距今 212 Ma 之前不久,可能结束于距今 200 Ma 左右,致使基性岩浆底侵至下地壳上部,先导致快速增温和缓慢减压,形成中-低压麻粒岩,之后发生重力均衡调整,地壳回返隆升并遭受快速剥蚀,伴随有松弛性拉张作用使岩石中温度持续增高,压力快速降低,即 $-\triangle P>+\triangle T$,下地壳发生减压重熔,佛坪杂岩中出现混合岩,重熔岩浆与部分底侵基性岩浆混合形成具五龙等岩体地球化学特征的岩浆(王居里,1997)。区域上变质作用温度峰期要早于五龙岩体的侵位,故变质温度峰期形成的佛坪热递增变质带(图版Ⅰ)主要受深部拆沉的构造—热体制控制(张国伟等,1995),且以深部岩浆为主的热对流比热传导对变质带分布起着更重要的作用。由于佛坪地区处于对冲构造带部位,所以未出现与第一次拆沉相似的低压高温变质,而是以中压相系变质为主。由于地壳在变质峰期温度之后,密度降低,因而隆升降压,五龙岩体的岩浆便形成于下部地壳的降压熔融及地幔岩浆的混合,并随地壳抬升至浅部,故其侵入是属于高位冷侵入过程。由于它形成及侵位较晚,故不仅切割褶皱,也切割递增变质带,因此它不是变质的主要控制因素,而是深部变质、熔融上侵的产物。在地壳进一步抬升的后期,在马道杂岩(图版Ⅰ马道附近)北西及南东缘的北北东向边界断裂为缓倾正断层,大量伟晶岩脉沿其侵入,伟晶岩年龄值在 180～190 Ma(陈西京等,1993),同时,围绕佛坪穹隆发育一系列早-中侏罗世

盆地,并在西和县发育燕山中-晚期橄榄玄武岩,也可能表明该区存在拆沉有利于深部地幔岩浆上侵,即与深部拆沉体向西、向上断离有关,这与该区岩石圈地幔向 NEE 向作斜向陆内俯冲的动力学相关。

总之,拆沉模式可以很好地解释该区的软碰撞、盆地伸展、低压高温变质、递增变质带、花岗岩成因及现今地壳结构。

5.3　非刚性地块在碰撞期间的内部结构调整及其效应

造山带的结构组成和造山过程中块体间的调整极为复杂,这就决定着其不同构造部位的变质历史十分曲折,反映为变质时空域的纷繁交错(李三忠等,1999)。研究区南秦岭地块属扬子板块与华北板块强烈碰撞的部位,为组成复杂的非刚性地块,其在碰撞期间的内部调整与变质作用关系有以下 3 点独特性。

(1)碰撞阶段的碰撞型递增变质带叠加于拉张变质带或俯冲型高压低温变质带上,这在日本岛弧未见,却在阿拉斯加 Seward 半岛(Patrick and Lieberman,1988)及佛坪和勉县北部地区体现较好,这种叠加又有非均一叠加和均一叠加的差异。构造变形在造山带中都可能发生两两叠加或多者叠加,导致不同变质期或幕的变质岩石类型及不同类型的 PTt 轨迹共存于造山带、不同变质类型出现在同一空间、平衡与非平衡变质矿物组合交生于同一岩石。大陆岩石圈地幔中不同的过程也决定着变质的差异,如底侵与拆沉常导致变质与变形关系的不同。所有这一切都反映出造山带变质作用现今空间分布面貌是多种控制因素的综合结果。勉略带及邻区变质作用是勉略带俯冲、碰撞、抬升等过程的集中反映,赋存有丰富的大陆动力学意义。

(2)勉略带康县—高川段被光头山岩体侵入(图 1 及图版Ⅰ),表明其于中-晚三叠世全面关闭碰撞。扬子板块与南秦岭地块发生主造山碰撞,碰撞效应波及整个非刚性的地块内部,在佛坪地区主体形成"手风琴"式褶皱收缩,继之发生对冲推覆,其边界形态表明北部鄂尔多斯地块及汉南突起碰撞面皆较陡。碰撞造山体制下,南秦岭地块在南、北板块的夹击下,在佛坪一带发生褶皱逆冲带对冲作用(图 1,李三忠,1998),理论上地壳应当快速、大幅度地增厚。但是,从佛坪杂岩盖层的峰值温压分析,地壳增厚不大。根据佛坪、西水及铙峰的 PTt 轨迹对比,本文认为碰撞同时该区中部地壳存在楔入—挤出作用和深部存在拆沉作用,汉南地块楔入导致西水一带以向北的逆冲为主(李三忠,1998),石泉一带、碧口一带以走滑—侧向挤出为主(何建坤等,1997;王二七等,2001),佛坪一带深部以拆沉为特点。微构造分析表明,南秦岭地块南部的变质作用早期阶段发生于 S_1 片理形成的伸展期,温压较低,表明岩石圈地幔并无明显减薄。第二幕碰撞变形,佛坪地区地壳收缩挤压,褶皱增厚,地温受到扰动,在背斜褶皱核部变质要高。因而,早期压力总体升高,温度也增高;随后,如前所述,拆沉发生,地壳密度降低,上部地壳层次发生压力降低同时持续升温;同时,由于汉南地块的纵向挤入作用,石泉—铙峰一带(见图版Ⅱ右侧)中部地壳层次的岩片或块体发生向东的侧向挤出,岩石圈地幔发生拆沉,压力不变,温度升高,其幅度较大也可能有中部地壳层次的剪切加热及岩石圈地幔拆沉引起的异常热的双重效应。Collins(1994)也认为加热作用早于地壳增厚作用,并出现逆时针轨迹,可用幔源岩浆底侵作用来解释,或地壳增厚同时岩石圈减薄(即拆沉)的模式给予解释。递增变质

带东部(镇安东南)有部分位于推覆面下部的变质程度相对低的岩石保存,说明逆冲推覆作用使得等温面亦不规则;在后期热松弛调整过程中,造山带热结构未完全均一便得以快速隆升。各个地段在碰撞期间的构造过程存在一些差异,这也是其变质作用 PTt 轨迹相异的大陆动力学根本意义所在。

(3)碰撞过程中造山带不同部位隆升幅度与过程也有差异,勉县长坝乡向东至西水一带的勉略带的变质程度较东、西两侧要高,表明其深部抬升较高而出露。这可能与佛坪地区拆沉引起下部地壳密度降低,在重力均衡作用下呈穹隆形式的抬升密切相关。在康县—略阳段勉略缝合带被一系列 NW 向脆性走滑断层错切成若干段,据擦痕及雁列式石英脉判断,早期以左行走滑为主,晚期局部反转为右行。大区域古应力场分析表明这期走滑断层作用与区域 NE 向的斜向收缩,NW 向拉张的应力状态有关。此时,巴山弧以逆冲构造为主,走滑作用次之,或逆冲构造为晚期斜向陆内俯冲阶段的斜向楔入叠加成的复合构造;而在南秦岭地块北部主体为走滑作用。这一构造应力场主体由汉南地块斜向楔入产生,可和南阿尔卑斯与勃海姆(Bohemian)地块之间的走滑—挤出应力场对比(Peresson and Decker,1997)。南秦岭地块内的佛坪隆起、马道隆起等较深变质的地质体最终隆升可能也与此关联。

5.4 变质动力学的构造解释模式

在以往的研究中,人们将北部低压变质带与南部中压变质带按板块理论配对,提出是商丹洋俯冲产生的"双变质带"的认识。通过研究资料的积累,不能令人接受的是低压变质带与高压变质带的发生并不同时,而且,高温低压带发生在俯冲板块上,而不是俯冲带前方的岛弧上(见前文)。或许有人会认为与勉略洋俯冲有关,且由于本区岛弧出露很窄,故这种低压高温变质及岩浆作用出现在南秦岭地块内。但是,真正的安子山岛弧、三岔子岛弧等岩块或岩片却只出露于勉略缝合带中(图 1),在低压变质带部位并无发现,而且,低压变质作用发生时,整个南秦岭处于伸展背景下,因而,这种认识不能成立。实际上,勉略带及其北的南秦岭地块的变质时代为连续的海西—印支变质期,变质作用类型随不同空间、不同阶段而不同。为此,本文提出三阶段构造过程及模型(图 2)。

(1)多陆小洋盆离散阶段,南秦岭地块北部在刘岭群—舒家坝群中出现低压高温变质矿物组合;南秦岭地块南部三叠系及以下层位普遍出现低绿片岩相变质作用,且局部出现低压麻粒岩相变质;对勉略带中变辉长岩中的角闪石环带采用 Triboulet and Audren (1988)的方法,获得一退变质顺时针轨迹,推断早期等温快速降压与洋壳拉张、洋幔隆升有关,后期缓慢降温降压可能与其它围岩一致。表明这一时期变质作用随空间变化差异较悬殊。其构造背景为海西早期的"南张北压"的大构造背景下,北部俯冲的商丹洋洋壳板片拆沉(图 2,上)。

(2)俯冲阶段,勉略带中出现俯冲带和岛弧变质作用,在三岔子等地发现一些高压变质矿物,如多硅白云母、钠云母、黑硬绿泥石等;在安子山岛弧火山岩中进一步证实存在高角闪岩—高压麻粒岩相变质作用。根据变质反应、矿物生长史、变质变形关系及温压计算结果,分别确定了缝合带中麻粒岩(岛弧组成)、蓝闪—绿片岩相千枚岩等的 PTt 轨迹,表明都为顺时针轨迹,但东、西部俯冲所达深度不一。PTt 轨迹还显示出东部可能为

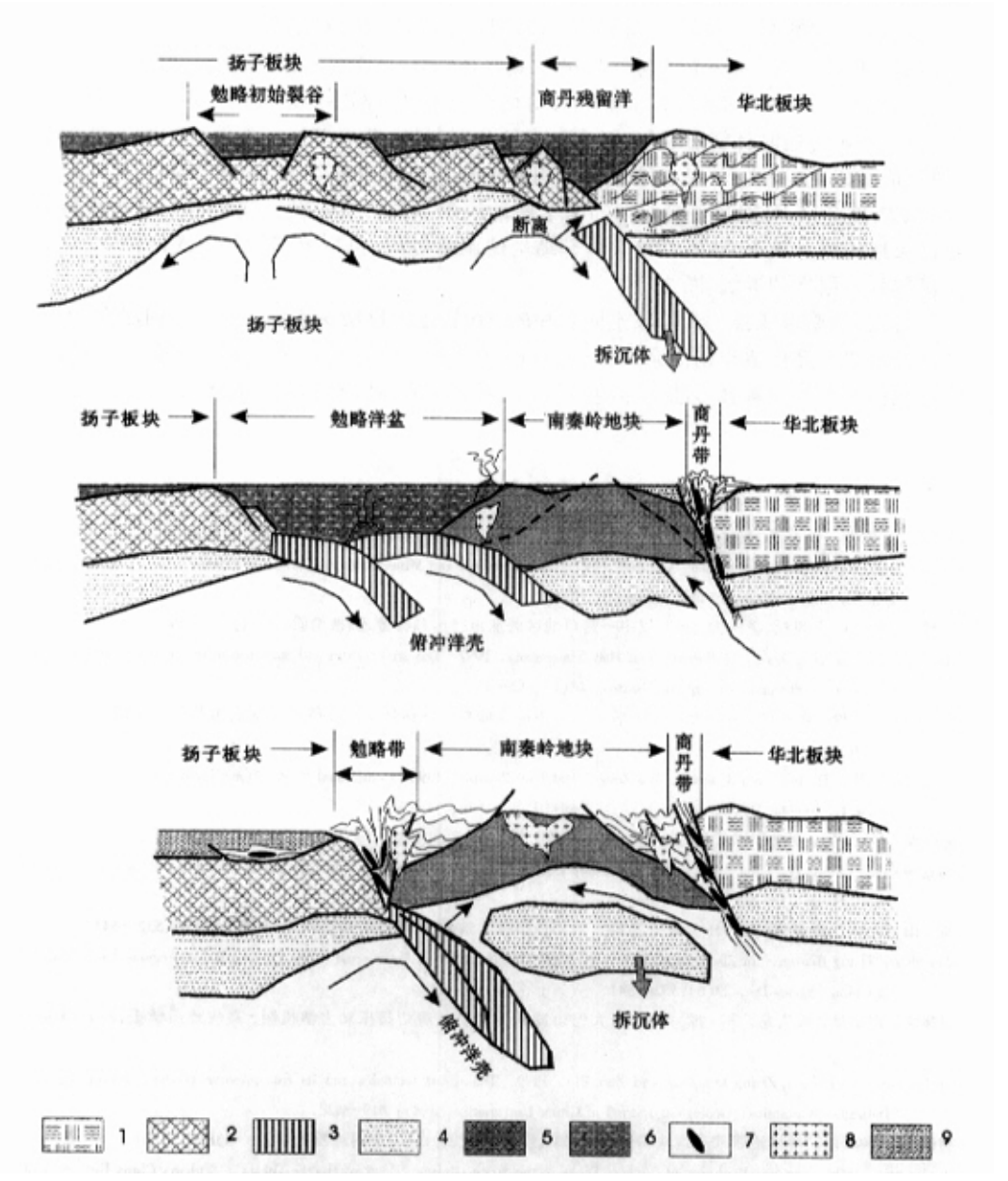


图 2　秦岭勉略缝合带康县—高川段及其北部南秦岭地块的变质动力学的构造解释模式

1. 华北板块;2.扬子板块;3.洋壳;4.岩石圈地幔;5.火山岩;6.沉积盆地;7 基性-超基性岩;8.花岗岩;9.前陆沉积

Fig. 2　A tectonic model for metamorphic dynamic process of the Mian-Lue Suture Zone and the Southern Qinling Block

热俯冲、西部可能属冷俯冲。其构造背景为勉略洋盆的剪刀式封闭以及洋内—陆缘的俯冲(图 2,中)。

(3)印支期勉略洋封闭、华北板块与扬子板块碰撞阶段,在南秦岭地块中形成了佛坪热递增变质带,在长坝—菜马河一带可见其叠加于俯冲带变质作用之上,因而导致勉略带东部和中部与西部变质程度的差异。对南秦岭地块南部不同地段所获 PTt 轨迹也不一致,石泉饶峰为逆时针轨迹,洋县酉水一带的为顺时针;前者等压升温轨迹与第二幕变形(即主造山碰撞)有关,与汉南地块楔入引起中部地壳平移挤出对应;后者可和佛坪地区的 PTt 轨迹对比,可能与碰撞同期的南秦岭地块深部的拆沉有关。其构造背景为板块碰撞的大地构造背景下,非刚性地块内部结构的调整过程,包括中部构造层次的楔入、挤出及深部构造层次的拆沉(图 2,下)。

总之,勉略带康县—高川段不同岩片的 PTt 轨迹组也反映缝合带是由不同层次、起源和环境的岩石经构造作用混杂而成,并反映了其不同的隆升剥蚀历史。研究还表明,小板片的拆沉可有效解释多陆小洋盆体制下形成的造山带的诸多地质现象。

参 考 文 献

陈西京,王淑荣,张秀颖. 1993. 秦岭花岗伟晶岩基本特征与成矿作用.北京:地质出版社. 1—75.

Chen Xijing, Wang Shurong and Zhang Xiuying. 1993. Basic Features and Mineralization of Granitic Pegmatites in the Qinling Orogen. Beijing: Geological Publ. House. 1—75.

陈家义,杨永成,李荣社,雷向光.1997.汉中—碧口地区的造山结构和构造.陕西地质, 15(1):12—19.

Chen Jiayi, Yang Yongcheng, Li Rongshe and Huo Xiangguang. 1997. The architexture and structure of the orogeny in Hanzhong-Bikon area, Shaanxi. Geology of Shaanxi, 15(1): 12—19.

邓晋福,赵海玲,莫宣学,吴宗絮,罗照华. 1996.中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙.北京:地质出版社. 1—96.

Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, Wu Zongxu and Luo Zhaohua. 1996. Continental Roots-Plume Tectonics of China——Key to the Continental Dynamics. Beijing: Geological Publ. House. 1—96.

董申保. 1986.中国变质作用及其与地壳演化的关系 北京:地质出版社. 1—225.

Dong Shenbao (formerly, Tung S P). 1986. Metamorphism in China and Its Relation with the Crustal Evolution. Beijing: Geological Publ. House. 1—225.

高 山,张本仁,金振民,Kern H. 1999. 秦岭—大别造山带下地壳拆沉作用.中国科学(D 辑),29(6):532—541.

Gao Shan, Zhang Benren, Jin Zhenmin and Kern H. 1999. Delamination of lower crust in the Qinling-Dabie orogenic belt. Science in China (Series D), 29(6):532—541.

何建坤,卢华复,张庆龙,朱 斌. 1997.南大巴山冲断构造及其剪切挤压动力学机制. 高校地质学报,3(4):419—428.

He Jiankun, Lu Huafu, Zhang Qinglong and Zhu Bin. 1997. The thrust tectonics and its transpressive geodynamics in southern Dabashan Mountains. Geological Journal of China Universities, 3(4): 419—428.

胡健民. 1998.南秦岭构造带武当地块构造演化[博士学位论文]. 武汉:中国地质大学. 1—118.

Hu Jianmin. 1998. Tectonic Evolution of Wudang Block in the South Qinling (Doctoral Degree Thesis). Wuhan: China University of Geosciences. 1—118.

赖绍聪,张国伟,董云鹏. 1997a.随州南周家湾变质玄武岩地球化学及其大地构造意义. 地球科学,22(4):362.

Lai Shaocong, Zhang Guowei and Dong Yunpeng. 1997a. Geochemistry of metabasalt at the Zhoujiawan, south Suizhou and its tectonic implication. Earth Science, 22(4): 362.

赖绍聪,张国伟,杨永成,陈家义.1997b.南秦岭勉县—略阳结合带变质火山岩岩石地球化学特征 岩石学报,13(4):561—573.

Lai Shaocong, Zhang Guowei, Yang Yongcheng and Chen Jiayi. 1997b. Petrology and geochemistry features of the metamorphic vol-

canic rocks in Mianxian-Liteyang suture zone, south Qinling. Acta Petrologica Sinica, 13(4): 561—573.

李三忠. 1998. 秦岭造山带勉略缝合带(康县—商川段)构造演化及其变质动力学[博士后出站报告]. 西安:西北大学. 1—102.

Li Sanzhong 1998. Tectonic Evolution and Metamorphic Dynamics of Mian-Lüe Suture Zone of Qinling Orogenic Belt from Kangxian to Gaochuan (Post-Doctoral Reports). Xi'an: Northwest University. 1—102.

李三忠, 张国伟. 1999. 造山带变质作用与构造—热演化. 见: 马宗晋, 杨主恩, 吴正文, 主编, 构造地质学—岩石圈动力学研究进展:庆贺马杏垣从事地质工作六十年暨八十寿辰. 北京:地震出版社. 114—129.

Li Sanzhong and Zhang Guowei. 1999. Metamorphism and tectono-thermal evolution of orogenic belt. in: Ma Zongjin, Yang Zhu'en and Wu Zhengwen. eds. Advances in Structural Geology and Geodynamics in China——in Honor of Academician Ma Xingyuan's 80th Birthday. Beijing: Seismological Press. 114—129.

李三忠,张国伟,李亚林,杨永成. 2000.勉县地区勉略带内麻粒岩的发现及构造意义.岩石学报, 16(2): 220—226.

Li Sanzhong, Zhang Guowei, Li Yalin and Yang Yongcheng. 2000. Discovery of granulite in the Mianxian-Liteyang suture zone, Mianxian area and its tectonic significance Acta Petrologica Sinica, 16(2): 220—226.

李三忠,张国伟,李亚林,姚安平. 2001.勉略带三岔子蛇绿岩的变质特征及构造意义.青岛海洋大学学报, 31(1): 89—94.

Li Sanzhong, Zhang Guowei, Li Yalin and Yao Anping. 2001. Tectonic implication and metamorphism of Sanchazi meta-gabbro from the Mian-Lüe suture zone of the Qinlin orogenic belt. Journal of Ocean University of Qingdao, 31(1): 89—94.

李曙光, 孙卫东, 张国伟, 陈家义, 杨永成 1996.南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据.中国科学(D辑), 26(3):223—230.

Li Shuguang, Sun Weidong, Zhang Guowei, Chen Jiayi and Yang Yongcheng 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia valley in the Mian-Lüe tectonic zone, South Qinling: Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time. Science in China (Series D), 39(3): 300—310.

李亚林,张国伟,李三忠,姚安平.2001.秦岭略阳—白水江地区双向推覆构造及形成机制.地质科学,36(4):465—473.

Li Yalin, Zhang Guowei, Li Sanzhong and Yao Anping. 2001 Characteristics and mechanism of Liteyang-Baishuijiang bilateral thrusting tectonics in the Qinling orogenic belt. Chinese Jour Geol., 36(4):465—473.

李映琴. 1991 略阳地区泥盆纪地层中 3T 型多硅白云母的成因机理及找矿意义 陕西地质, 9(2):69—75.

Li Yingqin. 1991. Implication of its prospecting and genesis of 3T type phengite in Devonian strata in the Liteyang area. Geology of Shaanxi, 9(2): 69—75.

马少龙. 1981.秦岭东段变质岩带的分布及其与板块构造的关系.见:中国地质学会构造地质专业委员会编,第二届全国构造地质学术会议论文选集,大地构造和前寒武纪构造(第一卷).北京:地质出版社. 67—78.

Ma Shaolong. 1981. Metamorphic rock belts in the east part of the Qinglin orogen and its relation to plate tectonics. in: Structural Geology Committee of Geological Society of China. ed. Selected Papers from the Second China Congress on Tectonics, Vol. 1 Tetonics and Precambrian Structures. Beijing: Geological Publ. House. 67—78.

孟庆任, 张国伟, 于在平, 梅志超 1996. 秦岭南缘晚古生代裂谷—有限洋盆沉积作用及构造演化.中国科学, 26(增刊):28—33.

Meng Qingren, Zhang Guowei, Yu Zaiping and Mei Zhuchao. 1996. Late Paleozoic sedimentation and tectonics of rift and limited ocean basin at the Qinling. Science in China, 26(Suppl.): 28—33

欧阳建平,张本仁 1996.秦岭造山带沉积物源地球化学研究及其构造意义.地球科学, 21(5):464—468.

Ouyang Jianping and Zhang Benren. 1996. Geochemistry of sedimentary provenance in Qinling orogenic belt and its implications for tectonic evolution. Earth Science, 21(5): 464—468.

宋鸿林. 1994.秦岭—大别造山带的伸展构造. 见:钱祥麟主编,伸展构造研究. 北京:地质出版社. 12—21.

Song Honglin. 1994. Early extensional structures of the Qinling-Dabie orogen. in: Qian Xianglin. ed. Extension Tectonics. Beijing: Geological Publ. House 12—21.

陶洪祥, 何俊亚, 王全庆, 裴先治. 1993.扬子板块北缘构造演化史. 西安:西北大学出版社. 1—137.

Tao Hongxiang, He Junya, Wang Quanqing and Pei Xianzhi. 1993. Historical Evolution of Tectonics in North Rim of Yangzi Plate.

Xi'an: Northwest University Press. 1—137.

王二七，孟庆任，陈智梁，陈良忠. 2001.龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因. 地学前缘，8(2)：375—384.

Wang Erqi, Meng Qingren, Chen Zhiliang and Chen Liangzhong. 2001. Early Mesozoic left-lateral movement along the Longmen-Shan fault belt and its tectonic implications. Earth Science Frontiers, 8(2): 375—384.

王居里. 1997.陕西佛坪五龙岩体的形成环境及其意义.西北地质科学，18(1)：19—24.

Wang Juli. 1997. The setting of Wulong Pluton in Foping county, Shaanxi province and its implication. Northwest Geological Science, 18(1): 19—24.

魏春景，杨崇辉，张寿广. 1998.南秦岭佛坪地区麻粒岩的发现及其地质意义.科学通报，43(9)：982—985.

Wei Chunjing, Yang Chonghui and Zhang Shouguang. 1998. Discovery and geological significance of granulite in Foping area, South Qinling. Chinese Sci. Bull., 43(9): 982—985.

许继峰，于学元，李献华. 1997.秦岭勉略带角闪岩相变质的安子山蛇绿杂岩的地球化学——古洋壳碎片的证明及意义. 科学通报，42(22)：2414—2418.

Xu Jifeng, Yu Xueyuan and Li Xianhua. 1997. Geochemistry of Anzishan hornblende facies meta-ophiolite in the Qinling orogen: implication and evidence of paleo-oceanic crust. Chinese Sci. Bull., 42(22): 2414—2418.

许志琴，卢一伦，汤耀庆. 1988.东秦岭复合山链的形成变形、演化及板块动力学.北京：中国环境科学出版社. 1—160.

Xu Zhiqin, Lu Yilun and Tang Yaoqing. 1988. Deformation, Evolution and Plate Dynamics of the Composite Eastern Qinling Orogen. Beijing: China Environment Science Press. 1—160.

杨崇辉，魏春景，张寿广，李惠民，万渝生，李荣社. 1999. 南秦岭佛坪地区麻粒岩相岩石锆石 U-Pb 年龄. 地质论评，45(2)：173—179.

Yang Chonghui, Wei Chunjing, Zhang Shouguang, Li Huimin, Wan Yusheng and Li Rongshe. 1999. U-Pb zircon dating of granulite facies rocks from the Foping Area in the southern Qinling mountains. Geological Review, 45(2): 173—179.

杨永成，陈家义，李荣社，霍向光. 1996.陕西勉略蛇绿构造混杂结合带组成及演化.陕西地质，14(2)：1—12.

Yang Yongcheng, Chen Jiayi, Li Rongshe and Huo Xiangguang 1996. Composition and evolution of the chaotic juncture of ophiolites structure in Mianxian-Liueyang area, Shaanxi. Geology of Shaanxi, 14(2): 1—12.

翟刚毅. 2000.东秦岭佛坪穹隆变质作用与构造动力学分析. 矿物岩石，20(2)：86—90.

Zhai Gangyi. 2000. Analysis of metamorphism and tectonic dynamics of domes in Foping county of east Qinling. Journal of Mineralogy and Petrology, 20(2): 86—90.

张宏飞，张本仁，凌文黎，高 山，欧阳建平. 1997.南秦岭新元古代地壳增生事件：花岗质岩石钕同位素示踪. 地球化学，26(5)：16—24.

Zhang Hongfei, Zhang Benren, Ling Wenli, Gao Shan and Ouyang Jianping. 1997. Late Proterozoic crustal accretion of south Qinling: Nd isotopic study from granitic rocks. Geochimica, 26(5): 16—24.

张宏飞，张本仁，赵志丹，骆庭川. 1996 东秦岭商丹构造带陆壳俯冲碰撞. 中国科学(D 辑)，26(3)：231—236.

Zhang Hongfei, Zhang Benren, Zhao Zhidan and Luo Tingchuan. 1996. Continental crust subduction and collision along Shangdan tectonic belt of east Qinling, China — evidence from Pb. Nd and Sr isotopes of granitoids. Science in China (Series D), 39(3): 273—282.

张国伟，郭安林，刘福田，肖庆辉，孟庆任 1996.秦岭造山带三维结构及其动力学分析.中国科学(D 辑)，26(增刊)：1—6.

Zhang Guowei, Guo Anlin, Liu Futian, Xiao Qinghui and Meng Qingren. 1996. 3-D architexture and dynamics analysis of the Qingling orogenic belt. Science in China (Series D), 26(Suppl.): 1—6.

张国伟，孟庆任，赖绍聪. 1995.秦岭造山带的结构构造.中国科学(B 辑)，25(9)：994—1003.

Zhang Guowei, Meng Qingren and Lai Shaocong. 1995. Compenents and tectonics in the Qinling orogen. Science in China (Series B), 25(9): 994—1003.

张国伟，张本仁，袁学诚，肖庆辉. 2001.秦岭造山带与大陆动力学.北京：科学出版社. 286—303.

Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng and Xiao Qinghui. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing:

Science Press. 286—303.

钟建华, 张国伟. 1998.陕西凤县八卦庙特大型金矿的成因研究. 地质学报, 71(2):150—160.

Zhong Jianghua and Zhang Guowei. 1998. On the genesis of the superlarge Baguamiao gold deposit in Fengxian county, Shaanxi province. Acta Geologica Sinica, 71(2): 150—160.

朱茂旭,骆庭川, 张宏飞. 1998.南秦岭东江口岩体群 Pb、Sr 和 Nd 同位素地球化学特征及其对物源的制约. 地质地球化学, (1):30—36.

Zhu Maoxu, Luo Tingchuan and Zhang Hongfei. 1998. Pb, Sr and Nd istopic geochemical characteristics of Dongjiangkou plutons in southern Qinling belt and constrains on their sources. Geology-Geochemistry, (1): 30—36.

朱　铭. 1995.秦岭地区花岗岩的 K-Ar 等时年龄和$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄及地质意义. 岩石学报,11(2):179—192.

Zhu Ming. 1995. The ages of K-Ar isochron and $^{40}Ar/^{39}Ar$ age of granites from Qinling area and their geological significance. Acta Petrologica Sinica, 11(2): 179—192.

Collins W J. 1994. Upper- and middle-crustal response to delamination: an example from the Lachalan fold belt, eastern Australia. Geology, 22: 145—146.

Dong Shenbao, Cui Wenyuan, Zhang Lifei, et al. 1996. The Proterozoic Glaucophane Schist Belt and Some Eclogites of North Yangtze Craton, Central China. Beijing: Science Press. 1—130.

Ernst W G. 1988. Tectonic history of subduction zones inferred from retrograde blueschist P-T paths. Geology, 16: 1081—1084.

Lai Shaocong and Zhang Guowei. 1996. Geochemical features of ophiolite in Mianxian-Lueyang suture zone, Qinling orogenic belt. Journal of China University of Geosciences, 7(2): 165—172.

Miyashiro A. 1994. Metamorphic Petrology. Tokyo: UCL Press. 27—238.

Patrick B E and Lieberman J E. 1988. Thermal overprint on blueschists of the Seward Peninsula: the Lepontine in Alaska. Geology, 16: 1100—1103.

Peresson H and Decker K. 1997. Far-field effects of Late Miocene subduction in the eastern Carpatians: E-W compression and inversion of structure in the Alpine-Carpathia-Pannonian region. Tectonics, 16(1): 38—56.

Triboulet C L and Audren C L. 1988. Controls on PTt deformation path from amphibole zonation during progressive metamorphism of basic rocks. Journal of Metamorphic Geology, 6: 117—133.

Xu Jifeng, Zhang Benren and Han Yinwen. 1994. Recognition of ophiolite belt and granulite in northern area of Mian-Lüe, southern Qinling, China and their implication. Journal of China University of Geosciences, 5(1): 25—27.

图 版 说 明

图 版 Ⅰ

1.中-新生代盆地;2.二叠-三叠系;3.上古生界;4.下古生界;5.震旦系;6.古元古代基底;7.太古界;8.花岗岩(海西—印支期未分);9.低压变质相带;10.中压变质相带;11.勉略带(高压变质相带);12.麻粒岩出露点;13.报道的及本文发现的低温高压矿物点;14.夕线石;15.十字石;16.蓝晶石带;17.石榴石;18.黑云母;19.红柱石;20.堇青石;21.弱或未变质带;22.城镇;23.变质带界线;24.逆断层;25.不整合界线;26.地层界线;GT.光头山岩体;WL.五龙岩体;DJK.东江口岩体

图 版 Ⅱ

1.结晶基底杂岩;2.勉略带;3.南秦岭地块中的盖层岩片;4.印支期花岗岩;5.逆冲断裂及走滑断裂;6.正断层;Al_2SiO_5 多相转变线及反应曲线等皆转引自 Miyashiro(1994):1. Stip(黑硬绿泥石) + Phn(多硅白云母) = Bt + Chl + Q + H_2O;2. Act(阳起石) + C_2 + Chl + Q = Hb(角闪石);3. Chl + Mus = Stau + Bt + Q + H_2O;4. Stau + Mus + Q = Alm + Al_2SiO_5 + Bt +

H_2O;5. Mus + Q = Al_2SiO_5 + Kf(钾长石) + H_2O;6. Hb + Alm + Q = Opx(斜方辉石) + Pl + H_2O;Or - Ab - Q - H_2O 系统最低熔融曲线为 A-A';A.沸石相;B.蓝片岩相;C.葡萄石—绿纤石相;D.绿纤石—阳起石相;E.葡萄石—阳起石相;F.绿片岩相;G.榴辉岩相;H.绿帘—角闪岩相;I.角闪岩相

METAMORPHIC DYNAMICS OF THE MIAN-LÜE SUTURE ZONE OF QINLING OROGENIC BELT AND THE SOUTHERN QINLING BLOCK

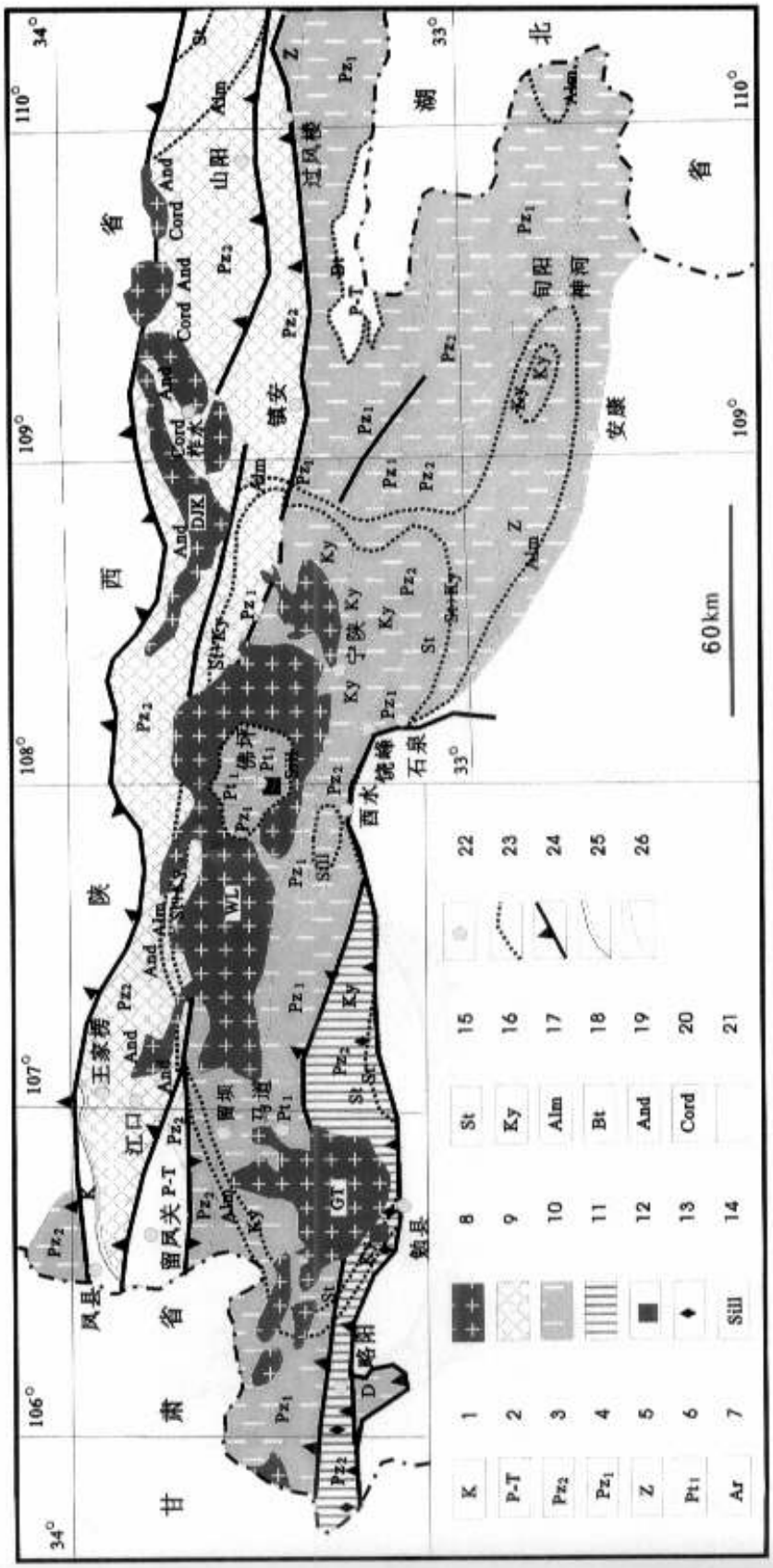
Li Sanzhong[1] Lai Shaocong[2] Zhang Guowei[2] Li Yalin[3] Cheng Shunyou[2]

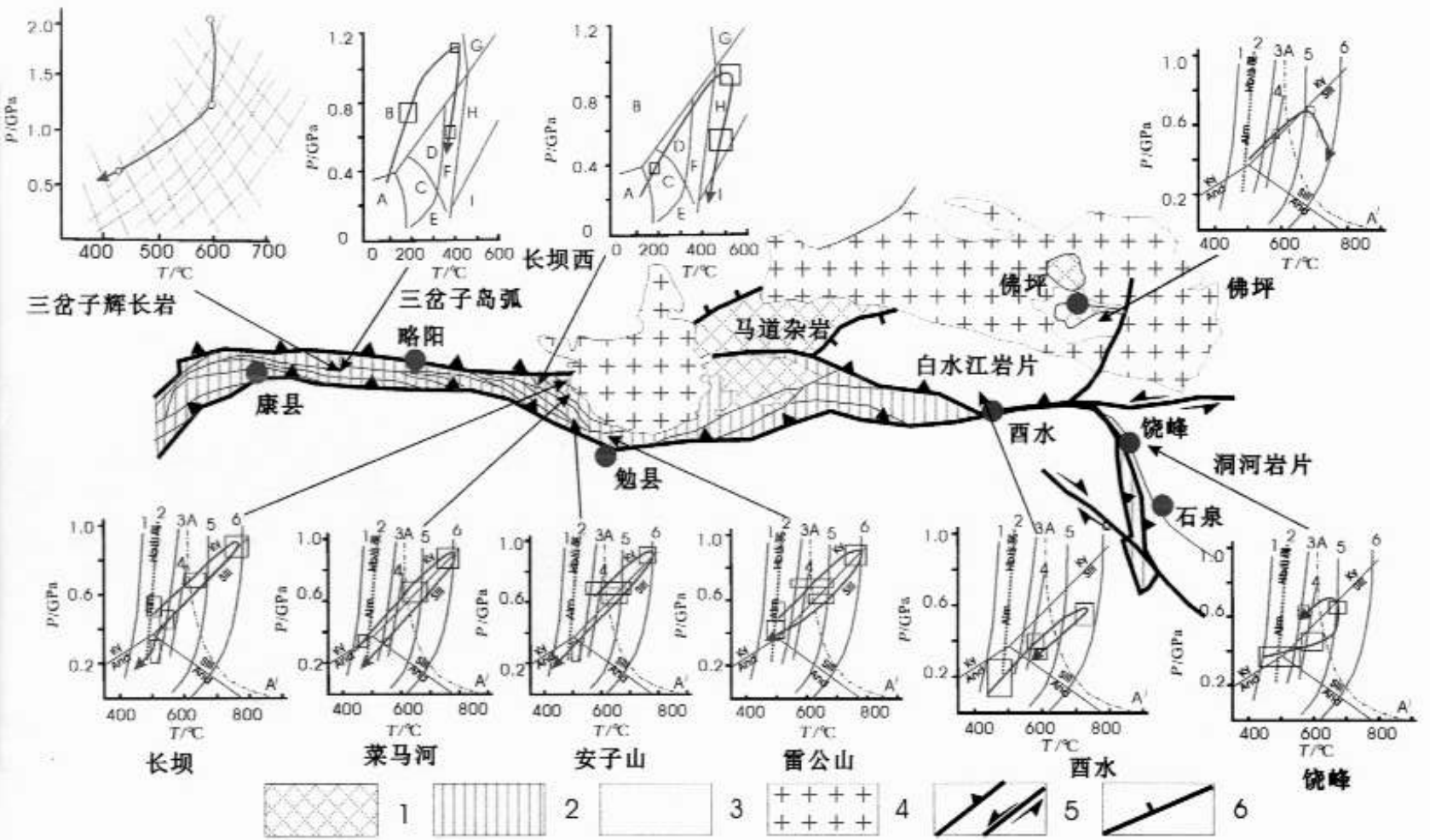
(1. *College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao* 266003;
2. *Department of Geology, Northwest University, Xi'an* 710069; 3. *Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059)

Abstract

Synthetic methods combining tectonics to metamorphic geology were applied to study metamorphic dynamics of the Kangxian-Gaochuan sector of the Mian-Lüe suture zone and its relation to the Foping progressive metamorphic zones in the Southern Qinling Block in this paper. The metamorphic time-space evolution in the suture zone showed coeval occurrence of different metamorphic types, such as subduction-type, extension-type in varied tectonic settings, superposition of different metamophisms (for example, subduction-type and syn-collision-type) at different metamorphic stages in the same region. The different uplift histories of varied segments in the suture zone were revealed in the paper. All of the results in the complexity of present spatial distribution of metamorphic types indicated that the Mian-Lüe suture zone was ophiolitic tectonic melange composed of a series of tectonic slabs with different datings, varied tectonic settings and structural levels. These slabs experienced different metamorphic evolution at the early metamophic stage, similar metamorphic superimposition at the middle stage and different uplift at the later stage in the Hycinian-Indosinian orogeny. Four stages of metamorphic evolution could be recognized, namely, the extensional metamorphic stage from the Hycinian to the early Indosinian, the subductional metamorphic stage from the later Hycinian to the Indosinian, the collisional metamorphic stage in the later Indosinian and the stage of contact metamorphism and dynamic retrogressive metamorphism at the latest Indosinian. PTt paths for different slabs in the Kangxian-Gaochuan sector of the suture zone and for the Foping progressive metamorphic zones revealed that they resulted from different metamorphic dynamics, tectonic processes and mechanisms of subduction, collission and delamination, which suggested that the suture zone was a tectonic melange one, composed of slabs in different structural levels, origins and tectonic settings. Denudation or uplifting in varied segments of the suture zone might be unhomogeneous.

Key Words The Mianxian-Liueyang suture zone, Metamorphic dynamics, Tectonic evolution, PTt path


甘肃省
陕西省
湖北省
凤县
江口
王家楞
留凤关
略阳
勉县
西水
饶峰
石泉
宁陕
佛坪
镇安
山阳
过风楼
旬阳
神河
安康
60km
K
P-T
Pz2
Pz1
Z
Pt1
Ar
St
Ky
Alm
Bt
And
Cord
Sill


三岔子辉长岩
三岔子岛弧
长坝西
佛坪
略阳
马道杂岩
白水江岩片
康县
西水
饶峰
洞河岩片
勉县
石泉
长坝
菜马河
安子山
雷公山
西水
饶峰
1
2
3
4
5
6