

https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.047



秦岭造山带是印支碰撞造山带吗?

任纪舜, 朱俊宾, 李崇, 刘仁燕

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要: 国内外一些学者认为秦岭是一个印支碰撞造山带,但迄今为止,秦岭尚未发现三叠纪或古生代延续到三叠纪的洋盆存在的任何痕迹.秦岭泥盆系—三叠系为滨、浅海相沉积,没有远洋沉积,更没有镁铁质和超镁铁质岩石及与之密切相关的放射虫硅质岩组成的蛇绿岩套.泥盆系与下伏地质体之间有一个清楚的区域性角度不整合.商丹断裂并不是印支期,而是加里东期的板块缝合带;其两侧,中朝板块南缘和扬子板块北缘均有十分清楚的加里东造山作用的记录.沉积于扬子板块北缘的中上泥盆统刘岭群的放射性铅同位素组成与北秦岭相近,碎屑锆石年龄谱系亦证明其物质主要来自中朝板块南缘的北秦岭造山带.所谓勉略印支缝合带中的勉略和三里岗蛇绿混杂岩中的镁铁质岩,同位素测年均为元古代之产物,后者又被南华系—震旦系沉积覆盖.所谓勉略缝合带,实为一区域性大断裂带.早古生代,其北侧属扬子板块北部被动边缘;南侧为扬子板块核心部分的扬子准地台(小克拉通).所以,秦岭的印支造山作用,并不是洋盆消失后的陆陆碰撞造山作用,而是海盆消失后的中朝与扬子2个小陆块间逆冲—叠覆造山作用.作为秦岭东延的大别山超高压变质带被认为是秦岭印支碰撞造山的重要证据之一,但大别山超高压变质岩是在造山作用过程中动态超高压条件下形成的,仅用简单的静岩压力来计算其形成深度,显然是不符合实际情况的.野外地质观察、构造地质学、变质岩石学、同位素地质学、地球化学、地球物理学以及物理实验等方面的实际资料和研究结果均说明超高压变质作用并不是在上地幔而是在地壳内进行的.南秦岭—大别山的地壳构造层次,上地壳自上而下依次为:未变质的沉积岩层、绿帘—蓝片岩层、高压变质岩层、超高压变质岩层;下地壳为未卷入超高压变质作用的麻粒岩相—高角闪岩相变质杂岩.含柯石英的超高压单位只是位于上地壳下部的厚约10~12 km的席状构造岩片.初步认为上地壳这一从低压到高压再到超高压的构造系统,是印支造山期间,南秦岭—大别山的上地壳以下地壳顶部为主剪切滑动面,多层次剪切作用造成的.上地壳下部的超高压变质岩,则可能是强烈剪切引起的频繁地震的震源区瞬时超高压作用的结果.

关键词: 秦岭造山带;印支造山运动;超高压变质岩;含柯石英榴辉岩;碰撞造山带;构造地质.

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1476-11

收稿日期: 2019-02-28

Is the Qinling Orogen an Indosinian Collisional Orogenic Belt?

Ren Jishun, Zhu Junbin, Li Chong, Liu Renyan

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: Since the late 1980s, the Qinling orogen has been considered an Indosinian collisional orogenic belt by some Chinese and foreign geologists. However, no trace of a Triassic oceanic basin or a Paleozoic oceanic basin that continued to Triassic has been found as yet in the Qinling area. It has been suggested that the Devonian-Triassic of the Qinling area is characterized by coastal to shallow marine sediments, and there are no pelagic sediments or ophiolites. There is a clear regional angular unconformity between the Devonian and its underlying rocks. The Shangdan fault is not an Indosinian but a Caledonian suture zone, both sides of which (i.e. the southern margin of the Sino-Korean plate and the northern margin of the Yangtze plate) have a clear record of the Caledonian orogeny. The Pb isotopic compositions of the Liuling Group of the Middle-Upper Devonian, deposited on the northern margin of the Yangtze plate, are similar to those of the North Qinling belt. The detrital zircon age spectrum also suggests that the sediments came from the North Qinling orogenic belt. Mafic rocks from the Mianlue and Sanligang

基金项目: 中国地质调查局项目(No.DD20190358).

作者简介: 任纪舜(1935—),男,研究员,中国科学院院士,长期从事区域地质和大地构造研究.E-mail: renjishun@cags.ac.cn

引用格式: 任纪舜,朱俊宾,李崇,等,2019.秦岭造山带是印支碰撞造山带吗?.地球科学,44(5): 1476-1486.

ophiolitic melanges within the Mianlue Indosinian suture zone show a Proterozoic age, and the Sanligang ophiolitic melange is overlain by the sediments of the Nanhuan-Sinian. The so-called Mianlue suture zone is actually a huge regional fracture zone, to the north of which was the passive margin of the Yangtze plate in Early Paleozoic and to the south lay the Yangtze paraplatform (small craton), the core of the Yangtze plate. Therefore, the Indosinian orogen of the Qinling should be attributed to the thrusting and overlapping of the continental crust rather than the continent-continent collision after the disappearance of the oceanic basin. The ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt of the Dabieshan, the eastern extension of the Qinling orogen, is considered an important piece of evidence suggesting that the Qinling was an Indosinian collisional orogen. However, the Dabieshan UHP metamorphic rocks were formed under dynamic UHP conditions during the orogenic process. Therefore, it is inappropriate to convert the estimated thermodynamic pressure to depth by assuming that the pressure was static simply due to burial. Accumulating data from field geological observations, structural geology, metamorphic petrology, isotope geology, geochemistry, geophysics, and physical experiments all indicate that the UHP metamorphism did not occur in the upper mantle but in the earth crust. Structurally, the upper crust of the South Qinling-Dabie region can be subdivided, from top to bottom, into four layers: unmetamorphosed sedimentary rocks, epidote-glaucophane schists, high pressure metamorphic rocks, and UHP metamorphic rocks. The lower crust is represented by the upper amphibolite-granulite facies rocks which were not affected by the UHP metamorphism. The coesite-bearing metamorphic rocks are merely sheeted slices of about 10–12 km thick in the lower part of the upper crust. Based on these observations, our preliminary conclusion is that the low-high-ultrahigh pressure tectonic system of the upper crust in the South Qinling-Dabie region was the result of multilayered decollement above the lower crust, acting as a main shear slide plane during the Indosinian orogeny. The UHP metamorphic rocks of the lower part of the upper crust were formed in response to repeated transient UHP events in the focal area, where frequent earthquakes were likely caused by severe shearing.

Key words: Qinling orogenic belt; Indosinian orogeny; UHP metamorphic rocks; coesite-bearing eclogite; collisional orogenic belt; tectonics.

秦岭是中国东部南北之间地质、地理、气候、环境的天然分界,正确判定其大地构造属性和发展历史,不但对认识秦岭本身,而且对认识中国东部大地构造、成矿规律和环境变化都有十分重要的意义。

自 1963 年姜春发等发表“秦岭地槽型印支运动的存在”(姜春发等,1963)以来,国内外地质学界已确认秦岭存在十分重要的印支造山运动(黄汲清等,1965,1974,1977;任纪舜等,1980,1990,1991,1999;王鸿祯,1985;张文佑,1986)。但对秦岭印支造山的性质,却有 2 种截然不同的见解:一些学者认为秦岭是一个印支碰撞造山带(Şengör,1985;Hsü *et al.*, 1987;王清晨等,1989;张国伟等,1995,1996,2003;葛肖虹和马文璞,2014);我们则一直认为显生宙的秦岭造山带并不是一个印支碰撞造山带,而是加里东、华力西、印支以至燕山的多旋回复合造山带(黄汲清等,1974,1977;任纪舜等,1980,1990,1991,1999)。印支造山作用在秦岭并不是洋盆消失后的陆—陆碰撞造山作用,而是海盆消失后的大陆地壳之间的逆冲—叠覆造山作用(任纪舜等,1990,1991,1999)。由于篇幅限制,本文将只讨论秦岭印支造山作用的性质及与之相关的大别山超高压变质作用的成因。

1 秦岭是印支碰撞造山带吗?

1.1 秦岭的印支造山作用:碰撞造山,还是大陆地壳逆冲—叠覆造山?

所谓碰撞造山带,是洋盆消失后陆—陆碰撞形成的造山带。秦岭如果真是一个印支碰撞造山带,在中朝板块与扬子板块碰撞之前,现今的秦岭地区必然要有一个三叠纪的或古生代延续到三叠纪的洋盆存在。但遗憾的是,迄今为止,各种比例尺的区域地质填图(陕西地质矿产局,未出版)和专题研究,在秦岭地区都没有发现这一洋盆存在的任何痕迹。主张印支碰撞造山的学者认为,这是由于碰撞之前洋盆已经俯冲作用消失了。然而,这种解释却令人难以信服。按板块构造理论,随着俯冲作用的进行,会产生“弧岩浆活动”,形成“俯冲增生杂岩带”。但在秦岭地区,既没有看到印支期俯冲作用形成的弧火山岩和花岗岩,更没有看见俯冲作用形成的“俯冲增生杂岩带”。再则,如果秦岭早古生代洋盆果真一直不间断地延续到泥盆纪或更晚,则靠近商丹俯冲碰撞带的扬子板块北缘,泥盆系应发育更全,海水也更深,并与志留系连续沉积。但实际情况却并非如此。经过多年的不断研究和野外调查,我们现在已可完全肯定,中朝与扬子板块之间,洋盆消失陆—陆碰撞造山

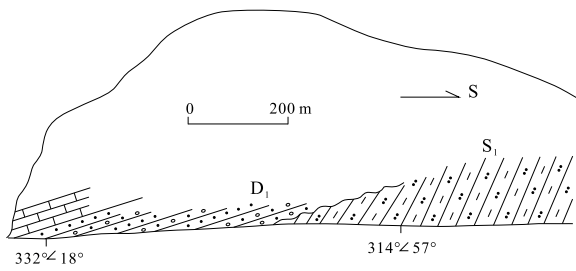


图 1 旬阳县潘家西北下泥盆统(D_1)砾岩、砂岩不整合于下志留统(S_1)泥质粉砂岩之上

Fig.1 The Lower Devonian (D_1) conglomerate and sandstone unconformably overlies the Lower Silurian (S_1) muddy siltstone in northwest Panjia area of Xunyang County
据江小均等(2019)修改

作用并不是发生在印支期,而是发生在加里东旋回;商丹断裂并不是印支期的缝合带,而是加里东期的缝合带。

加里东运动不仅在北秦岭,而且在南秦岭也有清楚的显示.秦岭的泥盆纪海盆并不是早古生代海盆的延续,而是加里东造山运动后,从西向东、从南向北新一轮海侵的结果.泥盆系与下伏地层之间有一区域性角度不整合:在南秦岭大部分地区,下泥盆统角度不整合于下志留统之上,在部分地区角度不整合在中上志留统之上,在山阳、柞水一带,中、上泥盆统角度不整合于寒武—奥陶系白云岩、震旦—寒武系白云岩之上(任纪舜等,1990,1991;杨应章和李海平,1991;江小均,2013;任纪舜,2013;江小均等,2019)(图 1).沉积岩的地球化学研究,也证明秦岭的早古生代与晚古生代不是一个连续的海洋盆

地:泥盆系—三叠系的碳酸盐岩具有相似的稀土元素地球化学特征,其 Ce/Y 比值为 1.44~4.06,稀土元素球粒陨石标准模式图呈 W 型,负 Ce、负 Eu 异常明显.与之相比,寒武系—奥陶系的碳酸盐岩, Ce/Y 比值为 7.29~9.50,富轻稀土,球粒陨石模式为陡右倾,负 Ce、负 Eu 异常不明显.说明早古生代和晚古生代—三叠纪沉积的地球化学特征是完全不同的,它们不属于同一海洋盆地的沉积物(任纪舜等,1990).

秦岭地区的泥盆系—三叠系是滨海—浅海相沉积,既没有蛇绿岩套,也没有大规模海底火山喷发和与之相伴的深海相沉积物.在凤县地区,虽然有三叠纪的浊积岩系,但它却是整合地覆盖在二叠纪浅海石灰岩之上的(姜春发等,1963,1979).而且从凤县向东,到镇安地区,早三叠世地层即相变为浅海相沉积(陕西地质矿产局,未出版).

以上这些事实充分说明,经加里东造山运动,中朝与扬子板块的大陆地壳已经碰撞连接.覆盖在商丹缝合带之南扬子板块地质体之上的中、上泥盆统刘岭群,与缝合带之北的中朝板块南缘的北秦岭造山带具有相近的放射性铅同位素组成(路凤香等,2006)(图 2).刘岭群中碎屑锆石图谱,也证明其物质主要来源于北秦岭,部分来自其南侧的小茅岭—陡岭隆起带(Dong *et al.*, 2013;江小均,2013).

南秦岭的加里东造山运动之所以长期未被地学界一些学者注意,可能是由于在中朝与扬子(小板块)加里东碰撞造山时,扬子板块属俯冲一侧,构造变形相对较弱.之后,加里东旋回形成的构造又卷入

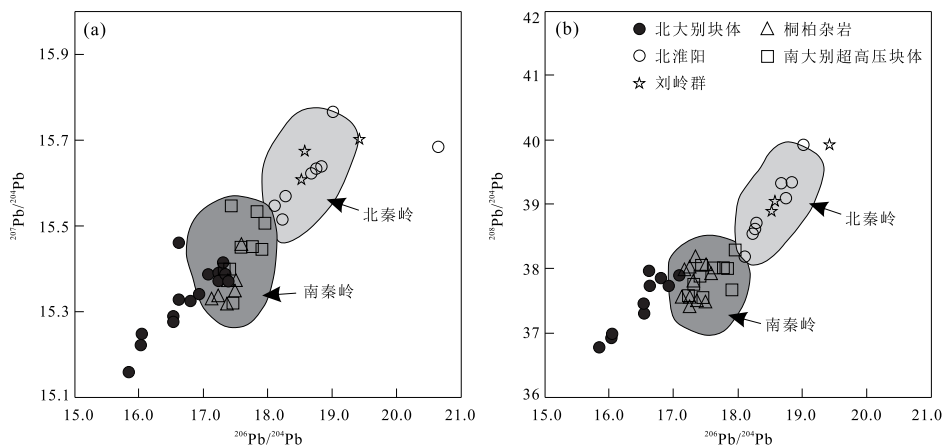


图 2 秦岭造山带 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

Fig.2 Plots of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ of Qinling orogen showing that the provenance of Liuling Group is from North Qinling

据路凤香等(2006)修改

印支造山过程,使其受到强烈改造所致。

在商丹印支缝合带被质疑否定之后,2003年,张国伟等提出勉略带是秦岭印支碰撞造山带的主要缝合带,并且把勉略带从略阳、勉县经北大巴山南缘(城口—房县断裂)延伸到大别山南缘(襄樊—广济断裂),统称为勉略缝合带。认为这一勉略缝合带是“中国大陆于印支期完成其主体拼合的主要缝合带”(张国伟等,2003)。然而,作为印支缝合带最重要的证据,即所谓的勉略蛇绿混杂岩带和三里岗蛇绿混杂岩带,经调查都不是石炭纪—二叠纪或三叠纪的,而是元古代的产物。勉略“蛇绿岩带”提出不久,我们研究集体的主要成员姜春发即会同陕西省地调队人员,进行了实地调查,提出它如果是蛇绿岩,其时代应更老(姜春发等,未出版)。后经闫全人等采样分析,铁镁质岩块 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 841~808 Ma(闫全人等,2007)。冯益民等(2004)在勉略带也没有发现石炭—二叠纪和三叠纪的深海沉积,其两侧泥盆纪—石炭纪同属华南古生物地理区,沉积建造和沉积序列都是浅海碎屑岩—碳酸盐岩沉积。大别山南侧三里岗地区所谓印支期蛇绿混杂岩,经石玉若等实地调查、采样,其时代也不是印支期,而是新元古代,SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 947 Ma,侵入其中的花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 876 Ma(Shi *et al.*, 2007)。

几年前,又有一些学者提出,大别山南侧的花山群是所谓板块俯冲增生杂岩带(胡正祥等,2015)。实际上,它并不是什么俯冲增生杂岩带,而是一套夹玄武质火山岩的沉积碎屑岩系。董云鹏等(1998)、张汉金等(2013)、田辉等(2017)的观察,均证实花山群沉积碎屑岩系不整合于中元古代打鼓石群白云岩、藻白云岩之上。其上被南华系不整合覆盖,其中所夹火山岩的同位素年龄为 820~815 Ma。

这里,还必须指出的是,不论三里岗“蛇绿混杂岩”,还是花山“增生杂岩带”,它们所在的位置均不是秦岭造山带,而是扬子准地台,其构造层位均在扬子准地台南华纪—震旦纪沉积盖层之下,并构成地台基底的一部分。

所以,我们说所谓“勉略缝合带”只是秦岭—大别造山带南缘的一条断裂带,并不是板块缝合带。断裂两侧均属于扬子板块:早古生代,断裂北侧为扬子板块的被动大陆边缘;断裂南侧为扬子板块稳定的核心部分,即扬子准地台(小克拉通)。秦岭的印支造山作用,并不是洋盆消失后中朝与扬子板块之间的碰撞造山作用,而是海盆消失后的中朝与扬子两个

陆块间逆冲—叠覆造山作用。

1.2 大别山的超高压变质作用:是大陆地壳深俯冲的结果吗?

1990年代初,随着大别—苏鲁地区印支期含柯石英榴辉岩的发现(Xu, 1987; Okay *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 1989; Yang and Smith, 1989; Zhang *et al.*, 1989),学术界逐步认可了我们于1979—1980年提出的对中国东部大地构造单元划分的重大改动:将桐柏—大别山从中朝克拉通分出,归入秦岭造山带(中国地质科学院地质研究所构造地质室, 1979;任纪舜等,1980)。由于含柯石英榴辉岩的最先发现地,欧洲阿尔卑斯造山带和斯堪的纳维亚加里东造山带的含柯石英榴辉岩,被认为是在碰撞造山过程中大陆壳深俯冲并快速折返的条件下形成的(Chopin, 1984, 1987; Smith, 1984)。这样,大别—苏鲁地区印支期超高压变质带的发现,似乎就不仅成为秦岭是一个印支碰撞造山带的有力证据,而且说明这里也曾发生过大陆壳深俯冲并快速折返的过程。

比重较轻的大陆壳之所以能发生深俯冲,一般的解释是比重较大的大洋地壳从俯冲到陆—陆碰撞的连续过程中,把比重较轻的大陆地壳拖带到地幔深处(Chopin, 1984, 1987)。如果这种说法是合理的、可信的,则形成超高压变质作用的前提条件必然是从大洋岩石圈俯冲,到陆—陆碰撞必须是一个连续不断的过程。然而,如前所述,秦岭地区泥盆纪—三叠纪时,并不是大洋环境,而是浅海环境。也就是说,秦岭印支造山时,不存在大陆壳深俯冲的前提条件。但客观存在的事实却是,大别山—苏鲁地区不但有含柯石英榴辉岩,而且是全球含柯石英榴辉岩出露规模最大的地方。在这里,理论模式(假说)与现实存在发生了尖锐的矛盾。这样,我们就不得不考察大别山和苏鲁地区印支期是否真的发生过大陆壳的深俯冲。

20世纪80年代末到21世纪初,大别—苏鲁地区的超高压变质带曾一度成为地学研究的热点之一。国内外学者进行了大量研究,不但有地质学、地球物理学、地球化学等各学科人员参与,而且还进行了深达5000余米的大陆科学钻探(Cong, 1996;《大别山超高压变质作用与碰撞造山动力学》编写组, 2005;Liu *et al.*, 2007;许志琴, 2007)。在工作中,虽然绝大多数学者均遵循大陆壳深俯冲的模型,但部分学者也敏锐地发现了一些与深俯冲相悖的科学事实,提出了不同的见解。

1990年,任纪舜等根据野外实地观察,指出“在

北大巴山、武当山和桐柏山—大别山南坡,元古界—下古生界均因强大的顺层韧性剪切滑脱作用,形成向南倒转或平卧的褶皱系统和逆掩断层,震旦—寒武系之下的整个元古界巨厚的浅变质沉积—火山岩系,几乎均受到强大的大致顺层的韧性剪切作用,拉伸线理、A 型褶皱随处可见。由于多硅白云母 K-Ar 年龄为 190~230 Ma,蓝闪石类矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 210~230 Ma,“变形无疑发生在印支造山时期”(任纪舜等,1990)。

1994 年,任纪舜进一步指出:“秦岭—大别山印支期高压—超高压变质作用已清楚地显示出浅(武当山,震旦纪沉积层之下的蓝片岩)、中(湖北木兰山,红安群中的蓝片岩)和深(安徽太湖,大别杂岩中含柯石英榴辉岩)3 个层次.认为含柯石英的榴辉岩并不是板块俯冲下插到地幔深处再快速折返的产物,而是在强烈的印支造山过程中,大陆地壳多层次拆离的结果.在研究高压—超高压变质矿物形成深度时,恐怕不能仅仅用静岩压力计算其形成深度,而应充分考虑在强烈剪切条件下构造运动的影响”(任纪舜,1994)。

Yui *et al.* (1995) 在苏鲁地区的青龙山发现 $\delta^{18}\text{O}$ 极贫的榴辉岩 ($\delta^{18}\text{O}$ 为 $-8\sim-10$),并据此提出这些榴辉岩的原岩在超高压变质前与贫 $\delta^{18}\text{O}$ 的大气水发生过氧同位素交换,在超高压变质作用过程中依然保留了这些痕迹.稍后,Zheng *et al.* (1996) 也报导了类似的结果.2000 年,丁悌平总结当时已经发表的大别—苏鲁地区超高压变质岩中的 $\delta^{18}\text{O}$ 测定结果,指出“迄今为止还没有人提出过氧同位素在超高压变质作用过程中有地幔流体的参与或与地幔物质发生过氧同位素交换作用的证据”(丁悌平,2000).说明超高压变质岩并不是在地幔中,而是在地壳内形成的。

1997 年,李延河对大别—苏鲁地区的榴辉岩进行了 He 同位素研究,发现与氧同位素一样,He 同位素研究也未能提供地幔物质参与含柯石英榴辉岩的超高压变质作用的证据(李延河等,1997;Li *et al.*, 2000).2005 年,李善芳、李延河、丁悌平等联合著文明确提出:“大别—苏鲁地区超高压变质榴辉岩的氦同位素数据均位于大气氦与大陆壳氦的过渡部位.利用真空压碎方法对榴辉岩中主要矿物石榴子石和绿辉石矿物流体包裹体的氦同位素组成进行了分析,也未发现明显地幔氦的存在(图 3).这些都说明大别—苏鲁地区含柯石英榴辉岩可能是在地壳中形成的,未曾俯冲至 100 多千米的地幔深处.含柯石

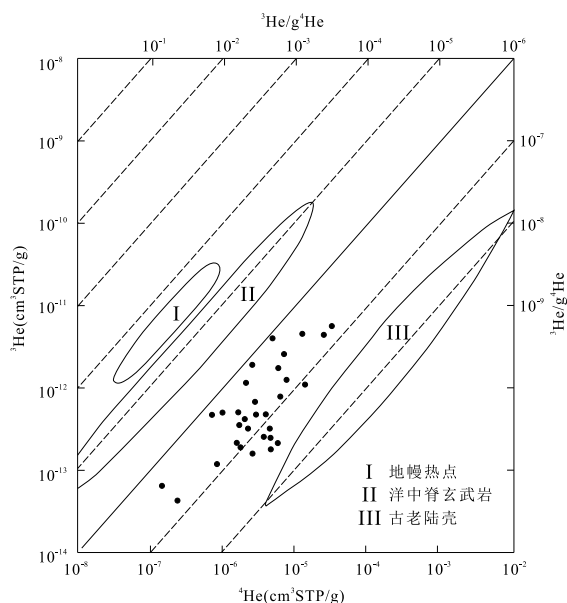


图 3 大别—苏鲁地区榴辉岩的氦同位素分布图
Fig. 3 Helium isotope compositions of eclogites from Dabie-Sulu region

据 Li *et al.*, (2000); 李善芳等(2005)修改

英大理岩、片麻岩和硬石英岩等非基性、超基性岩和脉状榴辉岩的发现,榴辉岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与围岩类型密切相关.榴辉岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与围岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值同步变化,均证明榴辉岩与其围岩一起经受了超高压变质作用.榴辉岩及其围岩在变质作用过程中未发生明显的位移,表明榴辉岩是原地成因的”(李善芳等,2005)。

吕古贤等(1998,2004)以构造附加静水压力的理论分析和测算方法为基础,实测出大别山英山县北超高压变质带中的含柯石英榴辉岩形成深度可能为 32 km 左右,而不是 100 km 或更深.苏文辉等通过物理实验研究,发现石英经过非晶化可以在相当于地震的时间尺度转变为柯石英,并由此提出形成柯石英的不均匀局域高压微区的作用模型.认为“地壳中因组成物质和应力的不均匀性,可形成许多小尺度不均匀局域高压微区,它们在造山带中的断裂剪切带中,受外界因素(如地震波和/或剪切应力)的影响,容易形成柯石英,是可能性最大的地壳中柯石英形成机制”(Su *et al.*, 2006; 苏文辉等,2009; 苏文辉,2011)。

近 10 余年来,杨建军通过野外实地观察和认真精细的室内研究,发现山东青岛仰口含柯石英榴辉岩在 20 m 内过渡为含进变质富钠斜长石的变辉长岩,压力下降了约 2 GPa.这样的压力差在俯冲板块内需要 60 km 的深度差.因此,不是埋深所致.高压

矿物微晶呈星射状围绕残余火成岩矿物生长,石榴石具有筛状结构,是快速结晶的特征.被石榴石环绕的破碎火成岩矿物尚未愈合.榴辉岩相角砾岩中的粒间柯石英得以保留,指示高压变质作用之后的降压冷却时间 $<1 \times 10^4$ a (Yang *et al.*, 2014b).榴辉岩相碎裂岩脉中星散的铬铁矿微粒,相对母岩略富镁、铬、钴和镍,略贫硅和大离子亲石元素,指示通过断裂与附近的超镁铁岩发生了机械混合.围绕铬铁矿生长的富铬高压矿物是同震高压变质作用的证据.这些构造岩中的含水量低于围岩,表明是应力而非流体促进了高压变质作用 (Yang *et al.*, 2014a).因此,仰口榴辉岩更可能是地壳内地震波冲击造成的 (杨建军先生提供).

这里还必须提及的是,2005 年出版的《大别山超高压变质作用与碰撞造山动力学》一书 (《大别山超高压变质作用与碰撞造山动力学》编写组, 2005). 这是由孙枢领衔, 96 名多学科学者参与, 1997 年开始执行的国家自然科学基金重大项目最终的总结性科学论著. 该书虽然以大陆壳深俯冲为基调, 但其中一些实际资料和研究成果却说明大别山超高压变质作用可能并不是大陆壳深俯冲的产物.

由徐树桐、索书田、钟增球等主笔的“构造地质”一章, 作者这样写道: “目前获得的同碰撞或同造山的构造信息非常有限. 同碰撞变形主要保存于较大的榴辉岩及其他超高压—高压变质岩透镜体内部. 环绕这些透镜体的各种片麻岩中, 一般都找不到同碰撞的构造记录”. 这就是说, 深俯冲的直接构造

变形证据“非常有限”.

大别山造山带运动学特征作者概括为: “总体宏观图案是由北向南的逆冲; 运动体制由早期 (榴辉岩相阶段) 向南逆冲, 转变为晚期 (角闪岩相阶段) 向北伸展滑动, 但伸展滑动并未改变缩短逆冲的构造格局; 绿片岩相及以后阶段内有穹隆形成……”. 这里值得特别注意的是, 晚期伸展滑动并未改变早期缩短逆冲阶段的构造格局. 也就是说, 现在保存的大别山的地壳结构层次, 即是早期逆冲阶段的构造层次.

此章将印支造山阶段, 大别山的地壳结构自下而上分为: 未卷入超高压变质作用的、主要由麻粒岩相—高角闪岩相变质岩组成的核部变质杂岩 (CMC); 超高压变质岩层 (UHP); 高压变质岩层 (HP); 绿帘—蓝片岩层 (EB); 未变质的沉积岩层 (US) 5 个层次. 各层次之间为拆离 (滑脱) 带, 含柯石英的超高压单位为厚 10~12 km 的席状构造片岩 (图 4). 这里划分的 EB、HP、UHP 3 个层次, 与任纪舜于 1994 年将高压—超高压变质岩系划分的浅、中、深 3 个层次 (见前文) 基本一致.

由张本仁、张宏飞、高山等主笔的“地球化学结构”一章中, 作者揭示“大别山 4 个构造单元 (北淮阳 NHY、北大别即核部变质杂岩 CMC、南大别 UHP 和宿松 HP) 中出露的白垩纪花岗岩类一致显示出类似北大别杂岩的元素和同位素组成特征, 并具有较老的 Nd 模式年龄 (1.7~2.4 Ga), 结合考虑花岗岩体具有中深侵入成因特性 (非原地熔融), 可以说明花岗岩浆源区应位于超高压变质单元和地表核部

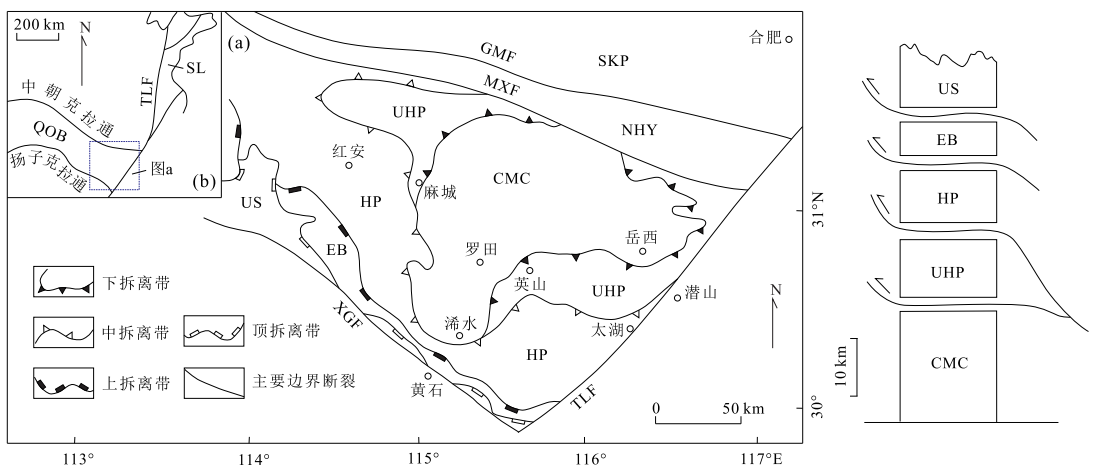


图 4 大别山构造层次简图

Fig.4 Simplified tectonic level map of Dabieshan

据《大别山超高压变质作用与碰撞造山动力学》编写组 (2005) 修改. GMF, 龟梅断裂; MXF, 磨子潭—晓天断裂; XGF, 襄樊—广济断裂; TLF, 郟庐断裂; QOB, 秦岭造山带; SL, 苏鲁带; SKP, 中朝板块; NHY, 北淮阳构造带; CMC, 核部变质杂岩; UHP, 超高压变质岩层; HP, 高压变质岩层; EB, 绿帘—蓝片岩层; US, 未变质的沉积岩层

杂岩之下,而且在地球化学特征上基本与地表出露的北大别变质杂岩一致.从而证明,在白垩纪花岗岩形成时期,大别山不同构造单元的地壳下部均应由类似于暴露于地表的北大别杂岩的岩石组成”。“这意味着北大别杂岩向北叠置于北淮阳块体之下,向南叠置于南大别杂岩(超高压岩片)和宿松变质杂岩(高压单元)之下”。“大别山超高压变质杂岩是一个仅限于地壳浅部的薄皮构造单元”.这些事实与“构造地质”一章所划分的构造层次不谋而合,完全相同.

依据上述事实,我们将印支造山时期,大别山的地壳结构划分为:由未变质沉积岩层、高压变质岩层和超高压变质岩层组成的上地壳,主要由麻粒岩相—高角闪岩相变质岩即核部变质杂岩组成的下地壳.

应该说,大别山这一地壳构造层次本身,就已否定了大陆地壳的深俯冲作用,因为,岩石圈是被驮在软流圈之上俯冲的.大别山地区如果真的发生过深俯冲作用,紧贴岩石圈地幔的下地壳必然要经受超高压变质作用,但代表大别山下地壳的核部变质杂岩(CMC),却神奇地躲过了超高压变质作用.

为了研究大别山超高压变质作用和大陆壳深俯冲,中国地质、地球物理学家曾进行了大量地球物理探测.但通过折射地震、深反射地震、宽角反射地震探测以及高分辨率地震层析研究,在大别山并未发现大陆壳深俯冲令人信服的证据.在孙枢领衔编写的这本书的“深部结构”一章中,作者说:“地震层析揭示,在超高压变质地体之下存在一个向北倾斜的高速体,可向下延伸 250 km”.但从所附的图件中,我们却怎么也看不出这一向北倾斜的高速体.在“地震剖面对大别山地球动力学解释的约束”一节,作者写道:“在深反射地震剖面 and 宽角反射地震剖面上,均显示在晓天一磨子谭断裂处的莫霍面存在错断,指示了华北与扬子两大板块的深部缝合带位置.应该说,缝合带处的这一莫霍面错断,是超高压变质杂岩俯冲和折返的唯一通道.”然而众所周知,中朝与扬子板块的缝合带并不是北淮阳构造带南侧的磨子潭—晓天断裂,而是北淮构造带北侧的龟梅断裂,它向西与商丹断裂直接相连.最近,李海龙等的研究表明,地震探测中发现的将 Moho 断开的磨子潭—晓天断裂,实为一条 171~142 Ma 燕山期强烈活动的走滑断裂带(李海龙等,2018).

超高压变质作用发生在大于 100 km 的深处,主要是岩石学家根据静岩压力换算的结果.但是,造山带中的高压、超高压变质作用并不是在静态条件下,而是在造山作用过程的动态条件下发生的.据

此,本文第一作者在 2000 年 8 月,美国斯坦福大学举办的“世界华人地质大会”上曾向毛和光院士提问,毛的回答是:“动态超高压还没有进行过实验研究”.这就是说,所谓大陆壳深俯冲进入地幔深处,形成超高压变质岩并没有实验研究的支持.

从上述各种事实和研究成果看,大别山的超高压变质作用并不是在地幔中,而是在地壳中进行的.超高压变质岩仅是上地壳下部一个薄皮构造岩片,其下为未卷入超高压变质作用的核部变质杂岩组成的下地壳.印支造山阶段,南秦岭—大别地区上地壳结构层次,自上而下依次为:未变质的沉积岩层(震旦系—三叠系 US)→绿帘—蓝片岩层(晚前寒武系 EB)→高压变质岩层(晚前寒武系 HP)→超高压变质岩层(晚前寒武系 UHP).从上而下,从低压到高压,到超高压,构成一个连续、完整、统一的构造系统.在未变质的沉积岩层次(US),发育向南倒转—平卧褶皱和逆掩断层;在高压—超高压层次(EB、HP、UHP)矿物拉伸线理、平卧—倒转褶皱和 A 型褶皱随处可见.很显然,这一连续统一的构造系统,是在一个强大剪切滑动的构造动力作用下形成的.据此,我们推测,秦岭—大别地区印支期的高压—超高压变质岩系,是中朝与扬子两个小陆块在逆冲—叠覆造山过程中,南秦岭—大别地区的上地壳以下地壳(核部变质杂岩)顶部为主剪切面,多层次强烈剪切滑动造成的.在强烈的剪切滑动中,必然地震频发,并在震源区形成瞬时超高压作用.大别山上地壳下部的超高压变质岩,极可能正是这些频发性地震震源区产生的瞬时超高压作用的结果.这一结论,恰好与苏文辉等的物理实验研究(Su *et al.*, 2006; 苏文辉等, 2009) 和杨建军等(Yang *et al.*, 2014a, 2014b) 在苏鲁带仰口的观察结果相互印证——地震产生的瞬时超高压导致超高压变质作用.联系秦岭—大别地区,震旦系—三叠系沉积层和晚前寒武系武当群、随县群、红安群变质沉积—火山岩系的沉积厚度以及造山过程中的挤压、缩短加厚,推测当时超高压变质作用大致发生在 20~30 km 深处的上地壳下部(当时该区地壳厚度可能达 50 km 以上),这个深度正是大多数大陆地震震源区所在的位置(图 5).对此,进一步深入研究,显然是十分必要的.我们相信,把高压—超高压变质岩系作为一个连续统一的构造系统,由构造地质学、变质岩石学、同位素地质学、同位素年代学、地球化学以及地震地质学等多学科专家联合进行更加深入细致地野外观察和室内测试分析,以及物理实验等方面的工

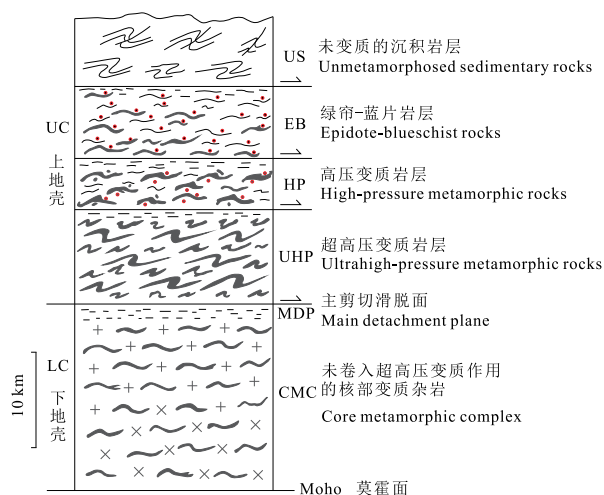


图 5 南秦岭—大别地区印支造山阶段地壳结构及上地壳剪切滑动变形示意

Fig.5 Sketch map showing the crustal structure and shear sliding deformation of the upper crust in the South Qinling-Dabie area during the Indosinian orogeny

作,定能为秦岭—大别—苏鲁地区的高压—超高压变质作用研究,画上一个圆满的句号。

2 结语

以上我们列举了一系列实际资料和研究结果,说明秦岭并不是印支碰撞造山带,大别山的超高压变质带仅是上地壳下部一个薄皮构造单元,它并不是大陆壳深俯冲的产物。由于大别山—苏鲁地区的超高压变质带被认为是全球规模最大、出露最好的超高压变质带,这样我们就有理由怀疑世界其他造山带中的超高压变质岩,可能也不一定是深俯冲的结果,超高压变质岩似乎不能作为碰撞造山带的标志之一。

3 后记

马杏垣先生是我(任纪舜)尊敬的师长,从 1960 年初到 2000 年,我们曾有长达 40 年的交往。早在 1961 年,当我在华南的调查研究小有收获时,马先生即约我到北京地质学院区域地质教研室进行学术交流。1979 年第二届全国构造会议后,在黄汲清、马杏垣先生的领导下,我曾长期参与中国地质学会构造地质专业委员会的工作,组织多次学术交流活动 and 野外地质考察。嵩山元古代构造、郟庐断裂和大同中生代逆冲断层等野外现场会议的精彩内容和热烈

气氛,至今仍印象深刻。在多年的密切接触中,使我有机会学习、领会马先生的学术思想和治学风格,获益匪浅。今值马杏垣先生 100 诞辰纪念之际,谨以此文表达我及我的学生对先生的敬意和深切怀念。

致谢:对地球科学编辑部主编赖旭龙教授和金振民院士、颜丹平教授的盛情相邀,杨建军研究员、任留东研究员的诚挚帮助和多次讨论,潘桂堂研究员和另一名审稿人的精心审核,谨在此表示衷心的感谢!

References

- Chopin, C., 1984. Coesite and Pure Pyrope in High-Grade Blueschists of the Western Alps: A First Record and Some Consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(2): 107–118. <https://doi.org/10.1007/bf00381838>
- Chopin, C., 1987. Very-High-Pressure Metamorphism in the Western Alps: Implications for Subduction of Continental Crust. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 321(1557): 183–197. <http://doi.org/10.1098/rsta.1987.0010>
- Cong, B. L., 1996. Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Science Press and Kluwer Acad. Publ., Beijing and Dordrecht.
- Ding, T. P., 2000. Isotopic Constraints on the Formation Depth of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks in the Dabie Region. *Journal of Geomechanics*, 6(3): 39–44 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. P., Liu, X. M., Neubauer, F., et al., 2013. Timing of Paleozoic Amalgamation between the North China and South China Blocks: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Ages. *Tectonophysics*, 586: 173–191. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.11.018>
- Dong, Y. P., Zhang, G. W., Liu, X. M., et al., 1998. Disintegration of the Huashan Group in the Dahong Mountain Area, Northern Hubei. *Regional Geology of China*, 17(4): 371–376, 397 (in Chinese with English abstract).
- Editing Board of Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Collisional Dynamics of the Dabie Mountains, 2005. Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Collisional Dynamics of the Dabie Mountains. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Feng, Y. M., Cao, X. D., Zhang, E. P., 2004. Discussion on the Tectonic Features of the Mianxian-Lueyang Zone. *Geological Review*, 50(3): 295–303 (in Chinese with English abstract).
- Ge, X. H., Ma, W. P., 2014. A Course in Regional Tectonics of China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hsü, K. J., Wang, Q. C., Li, J. L., et al., 1987. Tectonic Evolution of Qinling Mountains, China. *Eclogae Geol. Helv.*,

- 80;735—752.
- Hu, Z. X., Mao, X. W., Tian, W. X., et al., 2015. Discovery of the Jinningian Orogenic Belt on the Northern Margin of Yangtze Craton in Mountain Dahong. *Geological Survey of China*, 2(2): 33—39 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. Q., Ren, J. S., Jiang, C. F., et al., 1974. Some New Observations on the Geotectonic Characteristics of China. *Acta Geologica Sinica*, 48(1): 38—54 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. Q., Ren, J. S., Jiang, C. F., et al., 1977. An Outline of the Tectonic Characteristics of China. *Acta Geologica Sinica*, 51(2): 117—135 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. Q., Xiao, X. C., Ren, J. S., et al., 1965. Fundamental Characteristics of the Geotectonics of China—An Explanatory Note to the 1:3 000 000 Scale Geotectonic Map of China. China Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Jiang, C. F., Zhang, Q. G., Zhang, Y. X., et al., 1963. The Presence of the Indosinian Movement in Eastern Qinling Geosyncline. *Geological Review*, 9(3): 116—121 (in Chinese).
- Jiang, C. F., Zhu, Z. Z., Kong, F. Z., 1979. On the Liufenguan Flysch. *Acta Geologica Sinica*, 53(3): 203—218 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X. J., 2013. The Study of Sedimentary Characteristics and Tectonic Setting in Eastern Qinling Orogenic Belt (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X. J., Ren, J. S., Zhou, D. W., et al., 2019. The Caledonian Tectonic-Sedimentary Evolution Process in Eastern Qinling Orogenic Belt. *Earth Science*, 44(1): 88—108 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. L., Song, C. Z., Han, J. J., et al., 2018. The Comparison about the Shear Zones in the Northern and the Southern Boundary of the Tongbai Complex and Constraints on the Tectonic Framework of the Tongbai Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 813—836 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. F., Li, Y. H., Ding, T. P., et al., 2005. Helium Isotope Compositions and Forming Conditions of UHP Metamorphic Eclogites from the Dabie Mts. Terrane in East China. *Geological Review*, 51(3): 243—249 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. H., Li, J. C., Song, H. B., 2000. Helium Isotope Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Eclogites from the Dabie Mts. and Sulu Terrane in East China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 74(1): 14—18.
- Li, Y. H., Li, J. C., Song, H. B., et al., 1997. He Isotope of Eclogite from the Dabie and Su-Lu Region and Its Implication. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(Suppl.): 77—79 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Liou, J. G., et al., 2007. Ultrahigh-Pressure Mineral Assemblages in Zircons from the Surface to 5 158 m Depth in Cores of the Main Drill Hole, Chinese Continental Scientific Drilling Project, Southwestern Sulu Belt, China. *International Geology Review*, 49(5): 454—478. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.49.5.454>
- Lu, F. X., Zhang, B. R., Han, Y. W., et al., 2006. The Three-Dimensional Lithospheric Chemical Structure of Qinling-Dabie-Sulu Area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Lü, G. X., Chen, J., Li, X. B., et al., 1998. The Formation Depth of Coesite Bearing Eclogite, Dabie UHPM Zone, China, Modified by Tectonooriginal Additional Hydrostatic Pressure. *Chinese Science Bulletin*, 43(24): 2590—2602 (in Chinese).
- Lü, G. X., Wang, F. Z., Liu, R. X., 2004. Additional Tectonic Pressure and Formation Depths of UHP Metamorphic Rocks. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Okay, A. I., Xu, S. T., Sengör, A. M. C., 1989. Coesite from the Dabie Shan Eclogites, Central China. *European Journal of Mineralogy*, 1(4): 595—598. <https://doi.org/10.1127/ejm/1/4/0595>
- Ren, J. S., 1994. The Continental Tectonics of China. *Acta Geoscientia Sinica*, (3—4): 5—13 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. S., 2013. International Geological Map of Asia (1:5 000 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ren, J. S., Chen, T. Y., Niu, B. G., et al., 1990. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere in Eastern China and Adjacent Areas. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ren, J. S., Jiang, C. F., Zhang, Z. K., et al., 1980. Geotectonic Evolution of China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ren, J. S., Wang, Z. X., Chen, B. W., et al., 1999. The Tectonics of China from a Global View—A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions (1:5 000 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ren, J. S., Zhang, Z. K., Niu, B. G., et al., 1991. On the Qinling Orogenic Belt—Integration of the Sino-Korean and Yangtze Blocks. Northwest University Press, Xi'an, 99—110 (in Chinese).
- Section of Structural Geology, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 1979. Tectonic Map of China, Scale 1:4 000 000. Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Sengör, A. M. C., 1985. Geology, East Asian Tectonic Collage. *Nature*, 318(6041): 16—17. <https://doi.org/10.1038/318016a0>
- Shi, Y. R., Liu, D. Y., Zhang, Z. Q., et al., 2007. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Gabbro and Granite from the Huashan

- Ophiolite, Qinling Orogenic Belt, China; Neoproterozoic Suture on the Northern Margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 81(2): 239–243. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2007.tb00947.x>
- Smith, D. C., 1984. Coesite in Clinopyroxene in the Caledonides and Its Implications for Geodynamics. *Nature*, 310(5979): 641–644. <https://doi.org/10.1038/310641a0>
- Su, W. H., 2011. The Formation Mechanism of Coesite Far from Equilibrium Phase-Boundary and the Physical Foundation of Hypothesis of Plate Subduction-Exhumation in the Earth. *Geological Review*, 57(4): 457–472 (in Chinese with English abstract).
- Su, W. H., Liu, S. E., Xu, D. P., et al., 2006. Effects of Local Mechanical Collision with Shear Stress on the Phase Transformation from α -Quartz to Coesite Induced by High Static Pressure. *Physical Review B*, 73(14): 144110. <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.144110>
- Su, W. H., Liu, X. M., Xu, D. P., et al., 2009. On the Minimum Static Pressure for the Formation of Coesite and a New Mechanism of Coesite Formation near the Surface and Geological Implication. *Progress in Natural Science*, 159(7): 730–745 (in Chinese).
- Tian, H., Li, H. K., Zhou, H. Y., et al., 2017. Depositional Age of the Huashan Group on the Northern Margin of the Yangtze Plate and Its Constraints on Breakup of the Rodinia Supercontinent. *Acta Geologica Sinica*, 91(11): 2387–2408 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Z., 1985. Atlas of the Palaeogeography of China. Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, Q. C., Sun, S., Li, J. L., et al., 1989. The Tectonic Evolution of the Qinling Mountain Belt. *Scientia Geologica Sinica*, (2): 129–142 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. M., Liou, J. G., Mao, H. K., 1989. Coesite-Bearing Eclogite from the Dabie Mountains in Central China. *Geology*, 17(12): 1085. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<1085:cbeftd>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<1085:cbeftd>2.3.co;2)
- Xu, Z., 1987. Etude Tectonique et Microtectonique de la Chaîne Paleozoïque et Triasique des Quilings (Chine). Université des Sciences et Techniques du Languedoc, France, 96–98.
- Xu, Z. Q., 2007. Continental Deep Subduction and Exhumation Dynamics: Evidence from the Main Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling and the Sulu HP-UHP Metamorphic Terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3041–3053 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Q. R., Wang, Z. Q., Yan, Z., et al., 2007. SHRIMP Analyses for Ophiolitic-Mafic Blocks in the Kangxian-Mianxian Section of the Mianxian-Lueyang Mélange: Their Geological Implications. *Geological Review*, 53(6): 755–764 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Smith, D. C., 1989. Evidence for a Former Sanidine-Coesite-Eclogite at Lanshantou, East China, and the Recognition of the Chinese “Su-Lu Coesite-Eclogite Province”. In: Third International Eclogite Conference. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 26.
- Yang, J. J., Fan, Z. F., Yu, C., et al., 2014a. Coseismic Formation of Eclogite Facies Cataclastic Dykes at Yangkou in the Chinese Su-Lu UHP Metamorphic Belt. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(9): 937–960. <https://doi.org/10.1111/jmg.12101>
- Yang, J. J., Huang, M. X., Wu, Q. Y., et al., 2014b. Coesite-Bearing Eclogite Breccia: Implication for Coseismic Ultrahigh-Pressure Metamorphism and the Rate of the Process. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167(6): 1013–1030. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1013-7>
- Yang, Y. Z., Li, H. P., 1991. Sedimentary Characteristics and Geological Significance of the Devonian System in Southeastern Shanyang, Shaanxi Province. *Northwestern Geology*, 12(1): 5–10 (in Chinese).
- Yui, T. F., Rumble III, D., Lo, 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(13): 2859–2864. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00161-R](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00161-R)
- Zhang, G. W., Dong, Y. P., Lai, S. C., et al., 2003. Mianlüe Tectonic Zone and Mianlüe Suture Zone on Southern Margin of Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 33(12): 1121–1135 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Meng, Q. R., Lai, S. C., 1995. Tectonics and Structure of the Qinling Orogenic Belt. *Science in China (Series B: Chemistry)*, 25(9): 994–1003 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Meng, Q. R., Yu, Z. P., et al., 1996. Orogenesis and Dynamics of Qinling Orogen. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 26(3): 193–200 (in Chinese).
- Zhang, H. J., Ye, Q., Mao, X. W., et al., 2013. Sedimentary Characteristics and Tectonic-Paleogeography Significance of Huashan Group in Qingbaikou Period of Dahong Mountain, Hubei. *Resources Environment & Engineering*, 27(6): 737–740, 768 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Hirajima, T., Banno, S., et al., 1989. Coesite-Eclogite from Donghai Area, Jiangsu Province in China. *The 15th General Meeting of the International Mineralogical Association Abstracts*, 2: 923–924.
- Zhang, W. Y., 1986. Marine and Continental Geotectonics of China and Its Environs. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., et al., 1996. Extreme ^{18}O Depletion in Eclogite from the Su-Lu Terrane in East Chi-

na. *European Journal of Mineralogy*, 8(2): 317–324.
<https://doi.org/10.1127/ejm/8/2/0317>

附中文参考文献

- 丁悌平, 2000. 大别山超高压变质岩形成深度的同位素限制. *地质力学学报*, 6(3): 39–44.
- 董云鹏, 张国伟, 柳小明, 等, 1998. 鄂北大洪山地区“花山群”的解体. *中国区域地质*, 17(4): 371–376, 397.
- 《大别山超高压变质作用与碰撞造山动力学》编写组, 2005. *大别山超高压变质作用与碰撞造山动力学*. 北京: 科学出版社.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 2004. 勉县—略阳带大地构造属性之探讨. *地质论评*, 50(3): 295–303.
- 葛肖虹, 马文璞, 2014. *中国区域大地构造学教程*. 北京: 地质出版社.
- 胡正祥, 毛新武, 田望学, 等, 2015. 扬子陆块北缘大洪山地区发现晋宁期造山带. *中国地质调查*, 2(2): 33–39.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等, 1974. 对中国大地构造若干特点的新认识. *地质学报*, 48(1): 38–54.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等, 1977. 中国大地构造基本轮廓. *地质学报*, 51(2): 117–135.
- 黄汲清, 肖序常, 任纪舜, 等, 1965. 中国大地构造基本特征——三百万分之一中国大地构造图说明书. 北京: 中国工业出版社.
- 姜春发, 张庆贵, 张玉岫, 等, 1963. 东秦岭地槽型印支运动的存在. *地质论评*, 9(3): 116–121.
- 姜春发, 朱志直, 孔凡宗, 1979. 留风关复理石. *地质学报*, 53(3): 203–218.
- 江小均, 2013. 东秦岭泥盆系沉积特征和构造背景研究(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 江小均, 任纪舜, 周鼎武, 等, 2019. 东秦岭加里东期沉积—构造演化过程. *地球科学*, 44(1): 88–108.
- 李海龙, 宋传中, 韩建军, 等, 2018. 桐柏杂岩南北边界剪切带的对比以及对桐柏造山带构造格局的制约. *岩石学报*, 34(3): 813–836.
- 李善芳, 李延河, 丁悌平, 等, 2005. 大别山超高压变质榴辉岩的氦同位素组成及其形成环境的制约. *地质论评*, 51(3): 243–249.
- 李延河, 李金城, 宋鹤彬, 等, 1997. 大别—苏鲁地区榴辉岩的 He 同位素特征及其地质意义. *地球学报*, 18(增刊): 77–79.
- 路凤香, 张本仁, 韩吟文, 等, 2006. 秦岭—大别—苏鲁地区岩石圈三维化学结构特征. 北京: 地质出版社.
- 吕古贤, 陈晶, 李晓波, 等, 1998. 构造附加静水压力研究与含柯石英榴辉岩成岩深度测算. *科学通报*, 43(24): 2590–2602.
- 吕古贤, 王方正, 刘瑞珣, 2004. 超高压变质的构造附加压力与形成深度. 北京: 科学出版社.
- 任纪舜, 1994. 中国大陆的组成、结构、演化和动力学. *地球学报*, (3–4): 5–13.
- 任纪舜, 2013. 1: 500 万国际亚洲地质图. 北京: 地质出版社.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等, 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社.
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等, 1980. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等, 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社.
- 任纪舜, 张正坤, 牛宝贵, 等, 1991. 论秦岭造山带——中朝与扬子陆块的拼合过程. 西安: 西北大学出版社, 99–110.
- 中国地质科学院地质研究所构造地质室, 1979. 中国大地构造图(1: 400 万). 北京: 地图出版社.
- 苏文辉, 2011. 远离平衡相边界的柯石英形成机制及板块折返假说的物理基础. *地质论评*, 57(4): 457–472.
- 苏文辉, 刘曙娥, 许大鹏, 等, 2009. 柯石英最小静态形成压力与地表柯石英形成新机制及其地学意义. *自然科学进展*, 159(7): 730–745.
- 田辉, 李怀坤, 周红英, 等, 2017. 扬子板块北缘花山群沉积时代及其对 Rodinia 超大陆裂解的制约. *地质学报*, 91(11): 2387–2408.
- 王鸿祯, 1985. *中国古地理图集*. 北京: 地质出版社.
- 王清晨, 孙枢, 李继亮, 等, 1989. 秦岭的大地构造演化. *地质科学*, (2): 129–142.
- 许志琴, 2007. 深俯冲和折返动力学: 来自中国大陆科学钻探主孔及苏鲁超高压变质带的制约. *岩石学报*, 23(12): 3041–3053.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等, 2007. 秦岭勉略构造混杂带康县—勉县段蛇绿岩块—铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义. *地质论评*, 53(6): 755–764.
- 杨应章, 李海平, 1991. 陕西山阳东南一带泥盆系的沉积特征及地质意义. *西北地质*, 12(1): 5–10.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等, 2003. 秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 33(12): 1121–1135.
- 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: 化学)*, 25(9): 994–1003.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等, 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 26(3): 193–200.
- 张汉金, 叶琴, 毛新武, 等, 2013. 湖北省大洪山地区青白口纪花山群沉积特征及其构造古地理意义. *资源环境与工程*, 27(6): 737–740, 768.
- 张文佑, 1986. 中国及邻区海陆大地构造. 北京: 科学出版社.