

# 大别造山带变质岩温度压力结构研究

石永红<sup>①\*</sup>, 王娟<sup>①</sup>, 李秋立<sup>②</sup>, 林伟<sup>②</sup>

① 合肥工业大学资源和环境学院, 合肥 230009;

② 岩石圈演化国家重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

\* 联系人, E-mail: yonghongshi3110@sohu.com

2013-06-14 收稿, 2013-06-26 接受, 2013-07-29 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2009CB825008)和国家自然科学基金(41272073)资助

**摘要** 应用传统的岩石学温度压力计, 对大别造山带高压-超高压变质岩形成的温压条件进行了计算. 通过温压结构、岩石组合以及同位素年代学分析, 提出该造山带由 6 个岩石构造单元构成. 除(1) 北淮阳变质带变质温压条件较低外, 温度压力自北向南逐渐降低; (2) 北大别变质带(900±50 , 4.5±0.5 GPa)→(3) 中大别-I 带(728±58 , 3.87±0.36 GPa)→(4) 中大别-II 带(613±48 , 3.09±0.20 GPa)→(5) 南大别变质带(521±50 , 2.40±0.24 GPa)→(6) 宿松杂岩带(507±48 , 1.0±0.2 GPa), 峰期变质年龄也由北向南逐渐变老, 从 218~226 Ma→226 Ma→230 Ma→235 Ma→251 Ma. 且在中大别-I, II 带发现大量与南大别带属性相似的物质, 确证了宿松杂岩仅经历了绿帘角闪岩相变质, 缺乏高压蓝片岩相带的记录. 结合构造几何学和运动学研究表明, 这些单元均以构造岩片型式叠置产出, 具有穿时性, 彼此之间被断裂所分割, 这暗示大陆地壳俯冲过程中于不同深度发生拆离, 结果大别造山带是由多板片的俯冲/折返而成.

## 关键词

大别造山带  
P-T 条件  
岩石-构造单元  
俯冲-折返

大陆碰撞造山带结构框架的建立是构造解析及相关研究的基本前提. 就大别造山带而言, 其结构框架主要是建立在区域变质岩石学和构造地质学研究的基础上, 且经历了一个较长的发展过程<sup>[1-7]</sup>. 最初 Okay 等人<sup>[1,2]</sup>根据榴辉岩的分布特征, 将大别碰撞造山带分为南、北两个单元, 并进一步将南大别分为“冷”、“热”榴辉岩带. Cong<sup>[8]</sup>根据岩石组合特征、变质级别和榴辉岩的出露状况, 将该造山划分为北淮阳地块、北大别地块、南大别地块和宿松地块. Faure 等人<sup>[5,9]</sup>则从构造角度将其分为北大别浅变质单元、中大别混合岩单元、南大别高压-超高压单元和南部前陆褶冲单元. 随着北大别片麻岩穹隆中榴辉岩的发现<sup>[10,11]</sup>和南大别地块中白片岩<sup>[12]</sup>、低温超高压榴辉岩的确定<sup>[13]</sup>, 以及同位素年代学研究的深入<sup>[7,13-20]</sup>和岩石学的研究<sup>[21-28]</sup>. 最终, 郑永飞<sup>[29]</sup>自北向南将大别造山带分为北淮阳低级变质带、北大别(高温-超高压)变质带、中大别(中温-超高压)变质带、南大别(低温-超高压)变质带和宿松(低温-高压)变质带 5 个单元(图 1 中的插图), 这为深入阐明和理解大别碰撞造山带俯冲、折返及其形成机制奠定了基础.

尽管如此, 大别造山带精细结构单元的标定仍存在许多不同意见和看法. 这主要体现在: (1) 中大别中温-超高压变质带构成的复杂性. Zheng 等人<sup>[30]</sup>在该带菖蒲地区浅变质岩片的确定, 以及石永红等人<sup>[31]</sup>和 Lin 等人<sup>[32]</sup>在桐城和黄岗-牛凸岭地区(图 1)高压地块的确定, 指示了该单元的构成并不是简单完整的统一体; (2) 宿松杂岩变质级别及年龄标定的差异. 直至今日, 人们对于该杂岩变质程度主要存在低温高压蓝片岩相和绿帘角闪岩相变质两种不同的认识, 而同位素年龄差异更为显著<sup>[24,33-43]</sup>(图 2). 因此, 该杂岩的构造归属及在大别造山带形成过程中的作用也并不是十分明朗; (3) 研究程度的差异. 目前绝

**引用格式:** 石永红, 王娟, 李秋立, 等. 大别造山带变质岩温度压力结构研究. 科学通报, 2013, 58: 2145-2152

Shi Y H, Wang J, Li Q L, et al. The analysis of the temperature and pressure structure for metamorphic rocks in Dabie collision orogen. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2145-2152, doi: 10.1360/972013-594

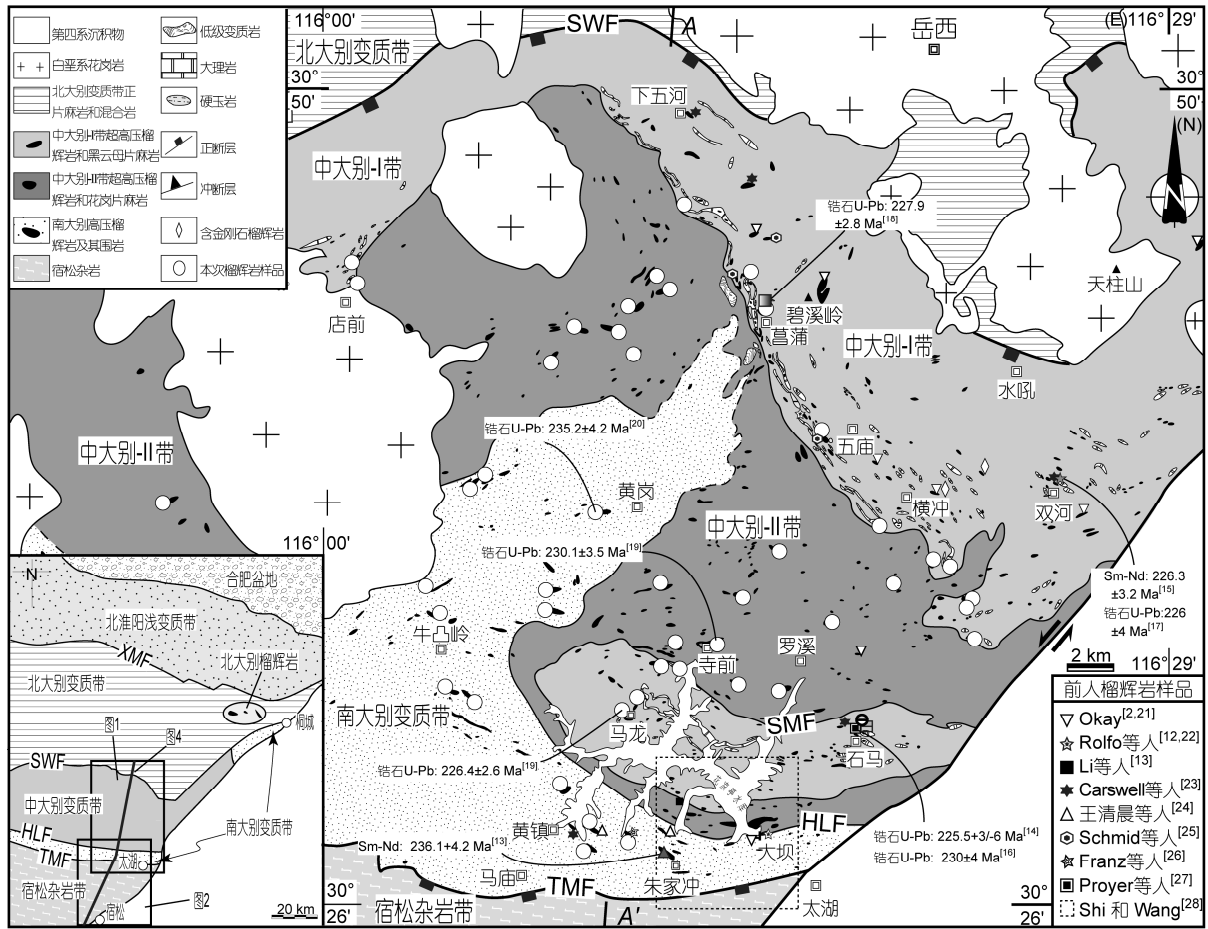


图1 大别造山带含榴辉岩地区地质简图

XMF, 晓天-磨子潭断裂; SWF, 水吼-五河断裂; TMF, 太湖-马庙断裂; HLF, 花凉亭断裂; SMF, 石马-马龙断裂

大多数的研究主要集中在大别造山带含有超高压变质岩的北、中、南大别变质带(图1), 而对于北淮阳变质带和宿松杂岩带涉及较少<sup>[38-40]</sup>, 且中、南大别变质带的研究也仅仅局限在下五河-菖蒲-五庙-横冲-双河和石马、朱家冲-黄镇一带<sup>[12,12-28]</sup>, 对于大别山腹地——罗溪-寺前-黄岗-牛凸岭一带几乎没有任何资料, 特别是区域变质岩石学的研究基本没有涉及。显然, 区域性研究资料的缺乏制约了对该造山带结构框架的准确判定。基于上述原因, 本文根据区域地质调查、变质岩石学和热力学研究, 并结合同位素年代学的分析和前人的研究, 对大别造山带整体构成及温压变化进行了探讨和分析。

### 1 不同变质单位峰期变质 *P-T* 条件估计

由于北、中和南大别超高压变质带及宿松杂岩带普遍含有大量特征性的岩石, 如榴辉岩和石榴云母

片岩, 十分有利于相关岩石学温压计的应用, 因此, 本文大别造山带精确的温压结构研究主要集中在这些单元。相比较而言, 北大别变质带的 *P-T* 条件研究相对较为薄弱, 这是因为该带榴辉岩出露相对较少(图1中插图)和多期变质叠加与改造<sup>[44,45]</sup>, 且矿物组合的单一, 这样为全面的、精确的 *P-T* 条件的限定带来了较大的困难。我们应用传统的岩石学温压计进行了估算<sup>[11,46]</sup>, 并结合金刚石<sup>[4]</sup>、柯石英和减压出溶结构<sup>[11,44,45]</sup>以及实验岩石学研究<sup>[47]</sup>, 获得北大别榴辉岩的温压条件大致分布在 850~950 °C 和 4.0~5.0 GPa 范围内(图3)。

对于中、南大别变质带和宿松杂岩带, 本文进行了细致的岩石学温度计应用。其中在中、南大别变质带中选取了 47 块榴辉岩样品(图1), 应用 Ravna 和 Terry<sup>[48]</sup>的石榴石-辉石-多硅白云母-蓝晶石-柯石英/石英地质温压计对这些样品进行 *P-T* 计算。为保证结

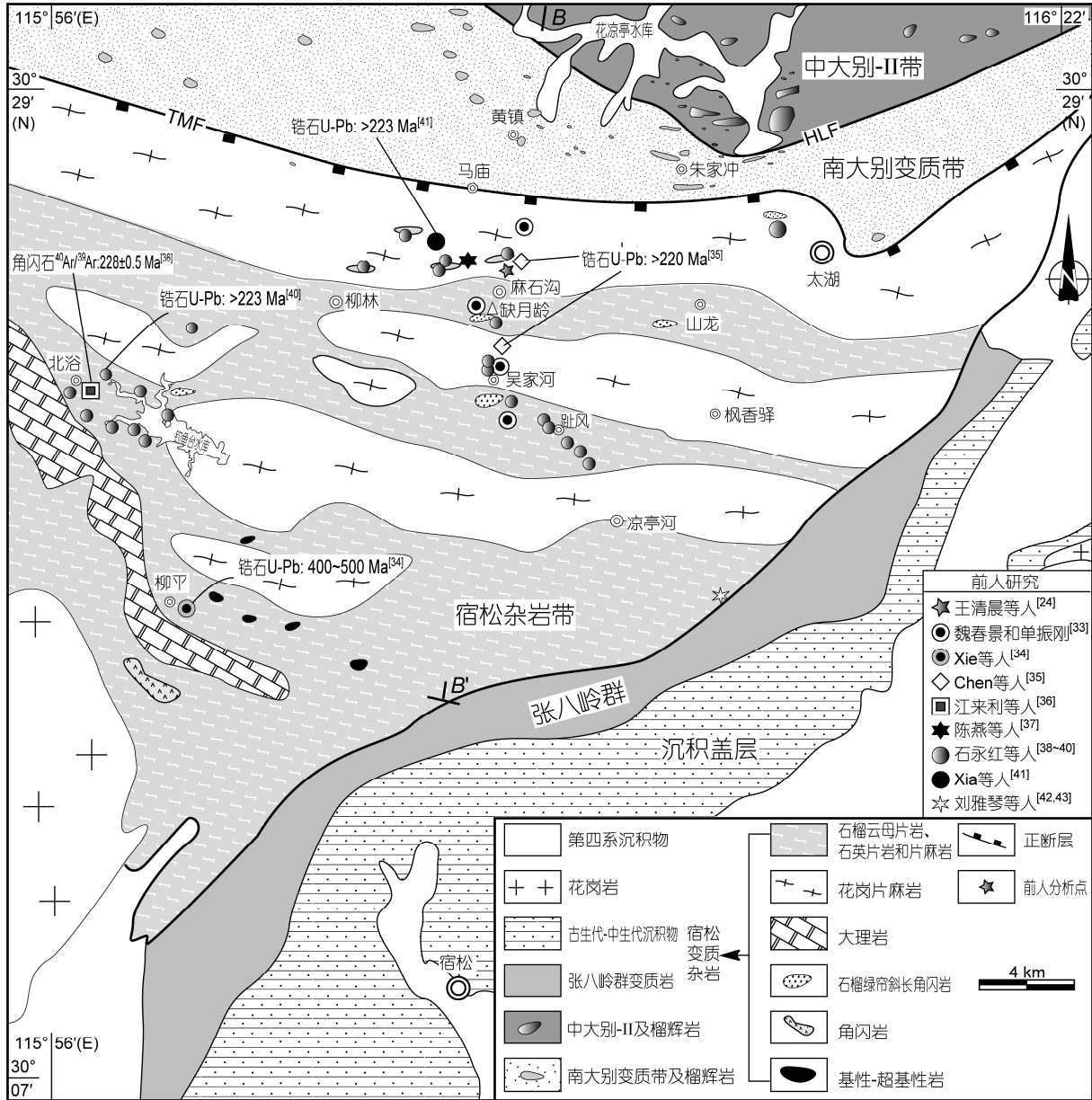


图2 宿松地区地质简图

果具有代表性, 每个样品均选取了 4-6 个矿物(多数为 6 个) 进行计算. 同时, 对前人 79 个榴辉岩样品也重新进行了温压计算. 结果显示, 这些榴辉岩的峰期变质  $P-T$  条件可分为 3 组: (1)  $728 \pm 58 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $3.87 \pm 0.36 \text{ GPa}$ (中大别-I 带); (2)  $613 \pm 48 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $3.09 \pm 0.20 \text{ GPa}$ (中大别-II 带); (3)  $521 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $2.40 \pm 0.24 \text{ GPa}$ (南大别变质带)(图 3). 结合榴辉岩的空间分布(图 1 和 4)及其岩相学特征和岩石组合类型, 中大别变质带可以进一步分为两个亚带: 中大别-I 带和 中大别-II 带, 其中 I 带

中榴辉岩多为粗粒结构, 含微粒金刚石<sup>[49]</sup>和柯石英, 常与大理岩共生, 而 II 带榴辉岩则为细粒结构, 柯石英及其假象常见于绿辉石、蓝晶石和石榴石中, 帘石和冻蓝闪石变斑晶十分发育, 且粒径多为 1-10 mm, 该类榴辉岩围岩主要为花岗片麻岩. 两者与南大别变质带有明显的差异. 同时, 在先前认为属于中大别变质带-大别山腹地牛凸岭-黄冈地区揭示出大面积的高压榴辉岩(图 1). 根据构造几何学特点可以看出, 牛凸岭-黄冈地区和马龙-石马地区分别以飞来峰和

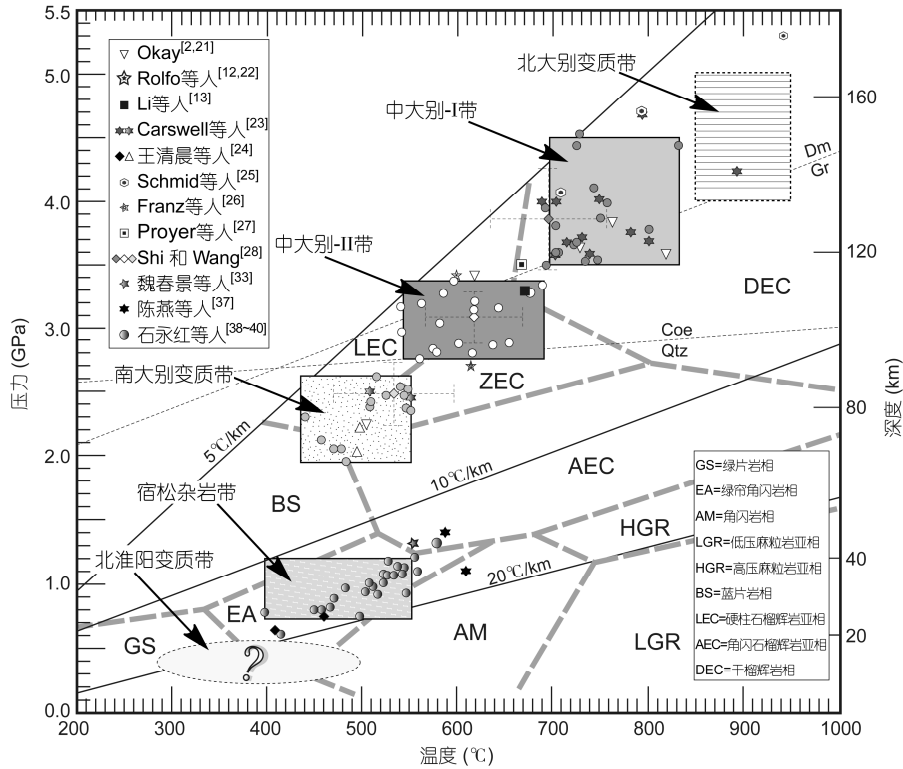


图3 不同变质单位峰期变质  $P-T$  条件图

构造窗形式产出(图 4), 它们的  $P-T$  条件显示了跳跃性的变化, 并非是整体一块。

宿松变质杂岩峰期变质  $P-T$  条件的评价主要是针对石榴云母片岩和部分石榴-斜长角闪岩。此带共选取了 23 个样品(图 2), 每个样品选取了 6 个矿物, 并应用 Holdaway<sup>[50]</sup>石榴石-黑云母温度计、Ravna<sup>[51]</sup>石榴石-角闪石温度计和 Wu 等人<sup>[52]</sup>石榴石-黑云母-斜长石-石英温度计、Kohn 和 Spear<sup>[53]</sup>石榴石-角闪石-斜长石压力计进行温压条件评价。结果显示, 宿松变质杂岩的温压范围:  $T=400\sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$  (平均  $507\pm 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),

$P=0.7\sim 12\text{ GPa}$  (平均  $1.0\pm 0.2\text{ GPa}$ ), 属于绿帘角闪岩相(图 3), 空间上也没有温度、压力分带现象(图 3 和 4)。并且区内未发现任何蓝片岩相岩石。

关于北淮阳变质带, 由于其变质级别较低<sup>[8,30,54-56]</sup>, 加之缺乏特征性的岩石类型和相应的温压计, 其峰期温压条件较难精确限定。但根据该变质带出露的千枚岩、板岩、片岩、部分条带状片麻状花岗岩的特征, 并结合在该带岩石分离的锆石中未测定出三叠纪 U-Pb 年龄这一特点<sup>[54-56]</sup>, 推测其变质程度主体为绿片岩相, 部分为低角闪岩相(图 3)。

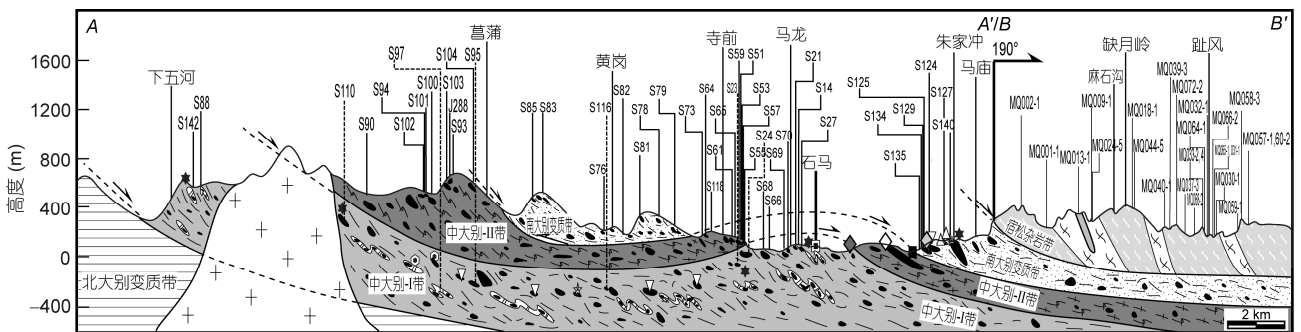


图4 大别造山带高压-超高压地块中各岩片结构剖面图

根据上述的温压计算,我们构建了大别碰撞造山带变质温压分带.除最北部的北淮阳变质带的具较低的温压条件外,自北向南,岩石变质的温度和压力依次降低(图 3):北大别变质带( $T>850^{\circ}\text{C}$ 和  $P>4.0\text{ GPa}$ )→中大别-I带( $T>650^{\circ}\text{C}$ 和  $P>3.5\text{ GPa}$ )→中大别-II带( $T>550^{\circ}\text{C}$ 和  $P>3.0\text{ GPa}$ )→南大别变质带( $T>500^{\circ}\text{C}$ 和  $P>2.0\text{ GPa}$ )→宿松杂岩带( $T>400^{\circ}\text{C}$ 和  $P>0.7\text{ GPa}$ ).在地温梯度变化方面,假设  $0.1\text{ GPa}\approx 3.3\text{ km}$  深度,根据温度和深度变化关系可以估计(图 3),宿松变质杂岩带具有较高的地温梯度( $\sim 15.4^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ),而北大别变质带、中大别-I,II 变质带以及南大别变质带均具有相对较低的地温梯度,分别为 $\sim 5.7, \sim 5.7, \sim 6, \sim 6.6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .显然,大别造山带的大陆俯冲存在显著的地温梯度差异,可以推测宿松杂岩带(低温/高压)可能位于俯冲地壳的上层,而北大别变质带可能位于底层(图 4).

## 2 大别造山带岩石-构造单元划分及成因探究

如果剔除北大别早白垩世伸展穹隆的影响,大别造山带的这种温压分带现象在岩石组合和变质年龄方面也有很好体现.其中:(1)北淮阳变质带主要

由浅变质岩石(佛子岭群)、片麻状花岗岩(卢镇关群)构成;(2)北大别变质带则是由含有少量榴辉岩、大理岩构造透镜体或岩块的混合岩穹隆构成;(3)中大别-I带则由花岗片麻岩、石榴绿帘斜长片麻岩、大理岩、粗粒榴辉岩和少量的硬玉石英岩、片岩构成;(4)中大别-II带主体由细粒榴辉岩和花岗片麻岩构成;(5)南大别变质带由黑云母片麻岩、片岩、具自形粗大石榴石结构的榴辉岩和花岗片麻岩组成;(6)宿松杂岩带则为石榴云母片岩、花岗片麻岩、大理岩和少量石榴石角闪岩.这些单元均以单斜岩层型式产出,并分别被晓天-磨子潭断裂、水吼-五河断裂、石马-马龙断裂、花凉亭断裂和太湖-马庙断裂所分割(图 1 和 4).结合我们的同位素年代学研究<sup>[19,20,40]</sup>和前人同位素年龄资料<sup>[6,11,29,44,45]</sup>可以看出,除北淮阳变质带只受到浅变质而缺乏三叠纪变质锆石 U-Pb 年龄外<sup>[54-56]</sup>,其余各单元变质年龄在空间分布上和俯冲深度上也存在渐次变化的特点:北大别(218~226 Ma)→中大别-I(226 Ma)→中大别-II(230 Ma)→南大别(235 Ma)→宿松杂岩(251 Ma)(图 5).

大别造山带不同变质带岩石在变质温压条件和

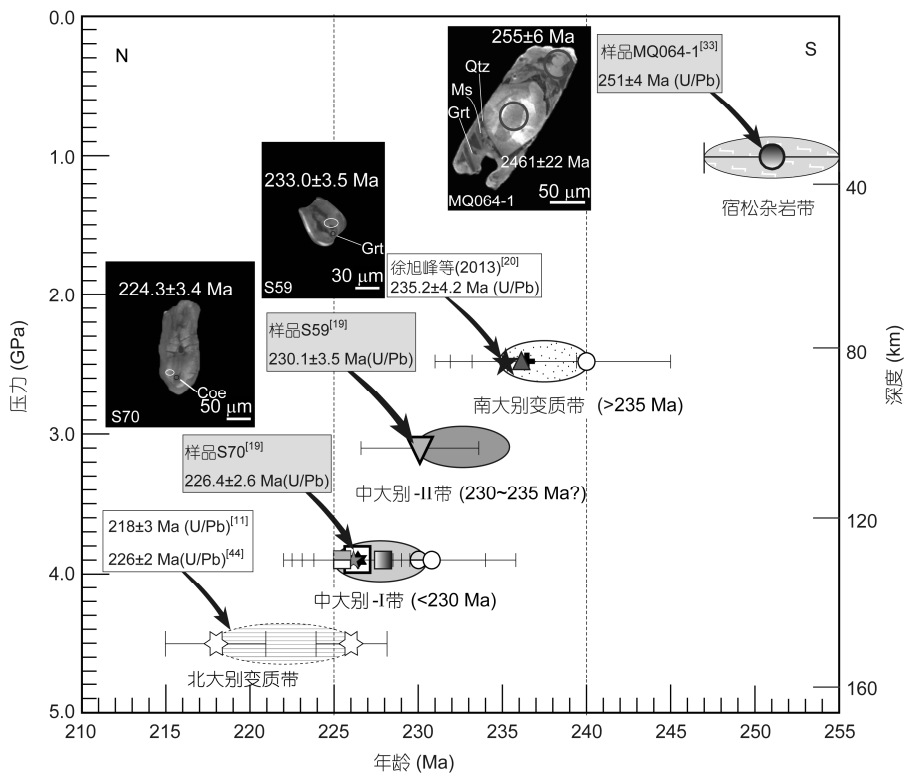


图 5 大别造山带高压-超高压单元中峰期压力对峰期变质年龄空间变化图

年代学上的差异以及空间分布样式和构造几何关系表明,我国东部大陆深俯冲带是由不同时代的岩片构造叠置而成(图4和5),现今的 $P$ - $T$ 分布样式和构造几何特点是由于高压-超高压岩石经历不同动力学背景的多板片、多期次构造折返而形成,具体可以采用大陆俯冲隧道模型<sup>[6]</sup>予以解释.其中,处于最北缘的北淮阳变质带作为构造加积楔并未卷入到深俯冲过程中,从而导致其较低的变质级别.卷入俯冲过程

的宿松杂岩可能最先发生拆离折返,且俯冲深度相对较浅.伴随着大陆深俯冲作用,南大别和北大别高压-超高压岩片开始俯冲至更深层次,并挤出宿松杂岩,致其沿着大陆俯冲隧道首先折返.类似地,伴随着大陆深俯冲过程,南大别变质带、中大别-II带、中大别-I带和北大别岩片依次在地幔不同深度发生拆离折返,且北大别岩片俯冲最深、折返最迟,因此变质程度也最高(图3).

**致谢** 感谢郑永飞院士和审稿人对本文严格细致的评阅及中肯的指正.

## 参考文献

- 1 Okay A I, Xu S, Sengor A M C. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. *Eur J Mineral*, 1989, 1: 595–598
- 2 Okay A I. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrain: Dabie Shan, China. *Eur J Mineral*, 1993, 5: 659–675
- 3 Xu S, Jiang L, Liu Y C, et al. Tectonic framework and evolution of the Dabie Mountains in Anhui, eastern China. *Acta Geol Sin*, 1992, 5: 221–238
- 4 Xu S T, Liu Y C, Chen G B, et al. Microdiamonds, their classification and tectonic implications for the host eclogites from the Dabie and Su-Lu regions in central eastern China. *Mineral Mag*, 2005, 69: 509–520
- 5 Faure M, Lin W, Scharer U, et al. Continental subduction and exhumation of UHP rocks: Structural and geochronological insights from the Dabieshan (East China). *Lithos*, 2003, 70: 213–241
- 6 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 2012, 328: 5–48
- 7 Leech M L, Webb L E. Is the HP-UHP Hong'an-Dabie-Sulu orogen a piercing point for offset on the Tan-Lu fault? *J Asian Earth Sci*, 2013, 63: 112–129
- 8 Cong B L. Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Beijing: Science Press, 1996. 1–224
- 9 Faure M, Lin W, Shu L, et al. Tectonics of the Dabieshan (eastern China) and possible exhumation mechanism of ultra high-pressure rocks. *Terra Nova*, 1999, 11: 251–258
- 10 魏春景, 单振刚, 张立飞, 等. 北大别榴辉岩的确定及其地质意义. *科学通报*, 1997, 42: 1832–1835
- 11 Liu Y C, Li S G, Gu X F, et al. Ultrahigh-pressure eclogite transformed from mafic granulite in the Dabie orogen. *J Metamorph Geol*, 2007, 25: 975–989
- 12 Rolfo F, Compagnoni R, Xu S, et al. First report of felsic whiteschist in the ultrahigh-pressure metamorphic belt of Dabie Shan, China. *Eur J Mineral*, 2000, 12: 883–898
- 13 Li X P, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Low-T eclogite in the Dabie terrane of China: Petrological and isotopic constraints on fluid activity and radiometric dating. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 148: 443–470
- 14 Rowley D B, Xue F, Tucker R D, et al. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U-Pb zircon geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 155: 191–203
- 15 Li S, Jagoutz E, Chen Y, et al. Sm-Nd and Rb-Sr isotope chronology of ultrahigh-pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, central China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 1077–1093
- 16 Ayers J C, Dunkle S, Gao S, et al. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in Dabie Shan Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, east central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. *Chem Geol*, 2002, 186: 315–331
- 17 Wu Y B, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. U-Pb, Hf and O isotope evidence for two episodes of fluid-assisted zircon growth in marble-hosted eclogites from the Dabie orogen. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 3743–3761
- 18 Liu D Y, Jian P, Kröner A, et al. Dating of prograde metamorphic events deciphered from episodic zircon growth in rocks of the Dabie-Sulu UHP complex, China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 250: 650–666
- 19 石永红, 王娟, 康涛, 等. 大别地块东南缘变质  $P$ - $T$  条件及锆石  $U/Pb$  年代学研究. *岩石学报*, 2013, 29: 1540–1558
- 20 徐旭峰, 石永红, 冀文冰, 等. 中大别腹地榴辉岩锆石  $U/Pb$  年龄及其类型归属. *岩石学报*, 2013, 29: 1559–1572
- 21 Okay A I. Paragonite eclogites from Dabie Shan, China: Re-equilibrations during exhumation. *J Metamorph Geol*, 1995, 13: 449–460

- 22 Rolfo F, Compagnoni R, Wu W, et al. A coherent lithostratigraphic unit in the coesite-eclogite complex of Dabie Shan, China: Geologic and petrologic evidence. *Lithos*, 2004, 73: 71–94
- 23 Carswell D A, O'Brien P J, Wilson R N, et al. Thermobarometry of phengite bearing eclogites in the Dabie Mountains of Central China. *J Metamorph Geol*, 1997, 15: 239–252
- 24 王清晨, 从柏林, Massonne H J. 大别山太湖-马庙断裂带两侧变质地体的增温变质作用. *岩石学报*, 1999, 15: 339–349
- 25 Schmid R, Franz L, Oberhänsli R, et al. High-Si phengite, mineral chemistry and *P-T* evolution of ultra-high-pressure eclogites and calc-silicates from the Dabie Shan, eastern China. *Geol J*, 2000, 3: 185–207
- 26 Franz L, Rome R L, Klemd R, et al. Eclogite-facies quartz veins within metabasites of the Dabie Shan (eastern China): Pressure-temperature-time-deformation path, composition of the fluid phase and fluid flow during exhumation of high-pressure rocks. *Contrib Mineral Petrol*, 2001, 141: 322–346
- 27 Proyer A, Dachs E, McCammon C. Pitfalls in geothermobarometry of eclogites:  $\text{Fe}^{3+}$  and changes in the mineral chemistry of omphacite at ultrahigh pressure. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 147: 305–318
- 28 Shi Y, Wang Q. Variation in the peak *P-T* conditions across the upper contact of the UHP terrane, Dabie Shan, China: Gradational or abrupt? *J Metamorph Geol*, 2006, 24: 803–822
- 29 郑云飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. *科学通报*, 2008, 53: 2129–2152
- 30 Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, et al. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: A passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. *Int Geol Rev*, 2005, 47: 851–871
- 31 石永红, 林伟, 王清晨. 大别山超高压变质带中牛凸岭地区低温高压榴辉岩的发现及其意义. *岩石学报*, 2008, 24: 1288–1296
- 32 Lin W, Shi Y H, Wang Q C. Exhumation tectonics of the HP-UHP orogenic belt in Eastern China: New structural-petrological insights from the Tongcheng massif, Eastern Dabieshan. *Lithos*, 2009, 109: 285–303
- 33 魏春景, 单振刚. 安徽省大别山南部宿松杂岩变质作用研究. *岩石学报*, 1997, 13: 356–368
- 34 Xie Z, Chen J E, Zheng Y F, et al. Zircon U-Pb dating of the metamorphic rocks of different grades from the southern part of the Dabie terrain in China. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26: 685–693
- 35 Chen F K, Siebe W, Guo J H, et al. Late Proterozoic magmatism and metamorphism recorded in gneisses from the Dabie high-pressure metamorphic zone, eastern China: Evidence from zircon U-Pb geochronology. *Precambrian Res*, 2003, 120: 131–148
- 36 江来利, 吴维平, 刘贻灿, 等. 大别山南部宿松杂岩的 U-Pb 锆石和 Ar-Ar 角闪石年龄及其地质意义. *岩石学报*, 2003, 19: 497–505
- 37 陈燕, 魏春景, 张景森, 等. 大别山南部高压-超高压变质地体中云母片岩和片麻岩的相平衡研究. *岩石学报*, 2005, 21: 1657–1668
- 38 石永红, 林伟, 王清晨. 大别山太湖地区宿松变质杂岩中石榴斜长角闪岩的 *P-T* 轨迹及反映的俯冲过程. *地质科学*, 2007, 42: 518–531
- 39 石永红, 林伟, 王清晨. 大别山南部黄镇-凉亭河一线宿松变质杂岩岩石学和峰期变质温压条件及与高压榴辉岩对比研究. *地质学报*, 2010, 84: 331–342
- 40 石永红, 王次松, 康涛, 等. 安徽省宿松变质杂岩岩石学特征和锆石 U-Pb 年龄研究. *岩石学报*, 2012, 28: 3389–3402
- 41 Xia Q X, Zheng Y F, Yuan H L, et al. Contrasting Lu-Hf and U-Th-Pb isotope systematics between metamorphic growth and recrystallization of zircon from eclogite-facies metagranite in the Dabie orogen, China. *Lithos*, 2009, 112: 477–496
- 42 刘雅琴, 胡克. 中国中部高铝质超高压变质岩. *岩石学报*, 1999, 15: 548–556
- 43 刘雅琴, 张树业, 乔兰勇. 华中陆壳高压变质带类白片岩的岩石矿物特征. *地质论评*, 1991, 37: 348–354
- 44 Liu Y C, Gu X F, Li S G, et al. Multistage metamorphic events in granulitized eclogites from the North Dabie complex zone, central China: Evidence from zircon U-Pb age, trace element and mineral inclusion. *Lithos*, 2011, 122: 107–121
- 45 Liu Y C, Gu X F, Rolfo F, et al. Ultrahigh-pressure metamorphism and multistage exhumation of eclogite of the Luotian dome, North Dabie Complex Zone (central China): Evidence from mineral inclusions and decompression textures. *J Asian Earth Sci*, 2011, 42: 607–617
- 46 石永红, 康涛, 李秋立, 等. 北大别北东地区榴辉岩温度条件分析. *岩石学报*, 2011, 27: 3021–3040
- 47 Malaspina N, Hermann J, Scambelluri M, et al. Multistage metasomatism in ultrahigh-pressure mafic rocks from the North Dabie Complex (China). *Lithos*, 2006, 90: 19–42
- 48 Ravna E J K, Terry M P. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists—An evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz. *J Metamorph Geol*, 2004, 22: 579–592
- 49 Xu S, Okay A I, Sengör A M C, et al. Diamonds from Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 1992, 256: 80–82
- 50 Holdaway M J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer. *Am Mineral*, 2000, 85: 881–892
- 51 Ravna E R. Distribution of  $\text{Fe}^{2+}$  and Mg between coexisting garnet and hornblende in synthetic and natural systems: An empirical calibration of the garnet-hornblende Fe-Mg geothermometer. *Lithos*, 2000, 53: 265–277

- 52 Wu C M, Zhang J, Ren L D. Empirical garnet-biotite-plagioclase-quartz (GBPQ) geobarometry in medium- to high-grade metapelites. *J Petrol*, 2004, 45: 1907–1921
- 53 Kohn M J, Spear F S. Two new geobarometers for garnet amphibolites, with application to southeastern Vermont. *Am Mineral*, 1990, 75: 89–96
- 54 Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, et al. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale  $^{18}\text{O}$  depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 4145–4165
- 55 Zheng Y F, Wu Y B, Gong B, et al. Tectonic driving of Neoproterozoic glaciations: Evidence from extreme oxygen isotope signature of meteoric water in granite. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 256: 196–210
- 56 Wu Y B, Zheng Y F, Tang J, et al. Zircon U-Pb dating of water-rock interaction during Neoproterozoic rift magmatism in South China. *Chem Geol*, 2007, 246: 65–86