科学通报 2013 年 第 58 卷 第 23 期：2251 ~ 2258
进 展 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

大陆岩板俯冲与折返的穿时性：桐柏造山带晚二叠-三叠纪高压变质地体提供的制约

刘晓春[①*]，江博明[②]，李三忠[③]

① 中国地质科学院地质力学研究所，国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室，北京 100081；
② 台湾大学地质科学系，台北 10699；
③ 中国海洋大学海洋地球科学学院，青岛 266100
* 联系人，E-mail: liuxchqw@cags.ac.cn

2013-05-27 收稿，2013-06-17 接受，2013-08-07 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2009CB825006)资助

摘要 桐柏造山带高压变质地体主要由两个高压岩片(Ⅰ和Ⅱ)及其北侧的绿片岩相构造混杂岩带和南侧的蓝片岩-绿片岩带构成. 高压岩片Ⅰ以北、南两条低温榴辉岩带为代表，构成桐柏山背形构造的两翼；高压岩片Ⅱ以桐柏杂岩中早白垩纪片麻状花岗岩内含有退变榴辉岩的变质岩包体为代表，构成桐柏山背形构造的核部. 综合 U-Pb, Lu-Hf, Rb-Sr 和 ^{40}Ar-^{39}Ar 同位素年代学研究表明，高压岩片Ⅰ的峰期变质年龄为 255 Ma，高压岩片Ⅱ的主期变质作用发生在 232~220 Ma，北侧构造混杂岩带的变质年龄为 256 Ma. 这种沿造山带横向上不同岩片的穿时性在红安-大别-苏鲁造山带高压/超高压变质岩中普遍存在，可以用同俯冲拆离/折返的构造模型来解释. 不仅如此，桐柏造山带高压岩片Ⅰ的变质时间比红安造山带与之对应的高压岩片约早 15 Myr，表明同一岩片在造山带纵向上可能也存在穿时性，采用翘翘板式俯冲/折返模型可以解释这种年代学差异以及华南陆块向西俯冲变浅的原因.

关键词
晚二叠-三叠纪
同俯冲拆离与折返
翘翘板式俯冲与折返
高压变质地体
桐柏造山带

形成于地幔深度的超高压岩石是如何折返到地表的，这一问题一直困扰着地质学家. 单纯的浮力和侵蚀作用似乎还不能合理地解释使柯石英得以保存的快速折返机制，其动因可能要从俯冲岩板的深部构造过程方面来寻找. 基于西阿尔卑斯高压/超高压变质地体之间的构造接触关系及变质间断的存在，Chopin[1]和 Schreyer[2]曾推测大陆岩板在沿低等地温线俯冲时末端可能不断发生破裂，先期俯冲的岩片在后续板片俯冲时就可以作为上盘连续向浅部折返. 刘晓春和胡克[3]较早注意到大别高压/超高压变质地体与西阿尔卑斯的相似性，并在后来对红安造山带的热压结构和年代学研究中做了系统论述[4,5]，划分出折返时间可相差约 30 Myr 的超高压、高压、低温高压等 3 个俯冲岩片和一个就位于浅部的构造混杂岩带，从而提出一个高压/超高压岩片不等时俯冲/折返的构造模型. 同样，通过精细的同位素定年，在大别-苏鲁造山带均已识别峰期变质时代不同的高压-超高压岩片，并建立了相应的多板片折返的动力学模式[6~12]. 大陆岩板的同俯冲拆离和差异折返将促使超高压岩石向浅表抬升，这一认识似已取得共识. 我们最近的研究工作表明，桐柏造山带虽无超高压岩石产出，但不同的中高压岩片之间仍表现出明显的穿时性[13~15]. 不仅如此，进一步的对比研究发现，同一岩片在造山带纵向上可能也存在时差，这为高压-超高压岩石的俯冲-折返过程及其动力学机制提供了新的制约. 本文在近 10 年研究工作的基础上，简要总结

引用格式：刘晓春，江博明，李三忠. 大陆岩板俯冲与折返的穿时性：桐柏造山带晚二叠-三叠纪高压变质地体提供的制约. 科学通报, 2013, 58: 2251–2258
英文版见：Liu X C, Jiang B M, Li S Z. Diachroneity of subduction and exhumation of continental slab: Constraints from the Late Permian-Triassic HP metamorphic terrane in the Tongbai orogen, central China. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-6067-9

了桐柏高压变质地体俯冲-折返过程中的穿时性特征，并对岩片在横向(垂直于造山带走向)和纵向(平行于造山带走向)上的穿时性提出了可能的解释模型.

1 桐柏高压变质地体的穿时性

桐柏高压变质地体主要由两个高压岩片(Ⅰ和Ⅱ)及其北侧的构造混杂岩带和南侧的蓝片岩-绿片岩带构成(图 1). 构造混杂岩带以北为泥盆纪复理石建造，以南为高压榴辉岩带，它们之间均为构造接触. 该带主要由绿片岩相变质的白(绢)云钠长片麻岩、绿片岩夹白云石英片岩组成，含有变质辉长岩和变质花岗闪长岩团块. 它们普遍经历了韧性剪切变形作用的强烈改造，从而形成各种糜棱岩或糜棱岩化岩石. 由于在红安造山带北部相同构造单元中获得的锆石 U-Pb 年代学数据主要集中在新元古代，因此一般认为构造混杂岩带代表华南陆壳的残片[5,16~18]. 黄少英等人[19]在韧性剪切带中获得了 256±1 Ma 的白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄，并将其解释为构造变形的时代. 根据该带岩石的变质变形特点，可将其与大别造山带北麓卢镇关杂岩类比.

高压岩片Ⅰ以北、南两条榴辉岩带为代表，构成桐柏山背形构造的两翼，主要组成岩石为花岗质糜棱岩、白云钠长片麻岩、白云石英片岩和大理岩，夹有榴辉岩及其退变产物石榴角闪岩的团块、透镜体或不规则条带. 常规地质温压计算揭示，北带榴辉岩形成的 *P-T* 条件略高，为 530~610℃和 1.7~2.0 GPa；南带榴辉岩略低，为 460~560℃和 1.3~1.9 GPa[13]. 这些结果与采用 THERMOCALC 平均温压计算获得的 490~540℃和 1.8~2.1 GPa[20]基本一致. 考虑到两条榴辉岩带在物质组成上的相似性，推测二者可能代表

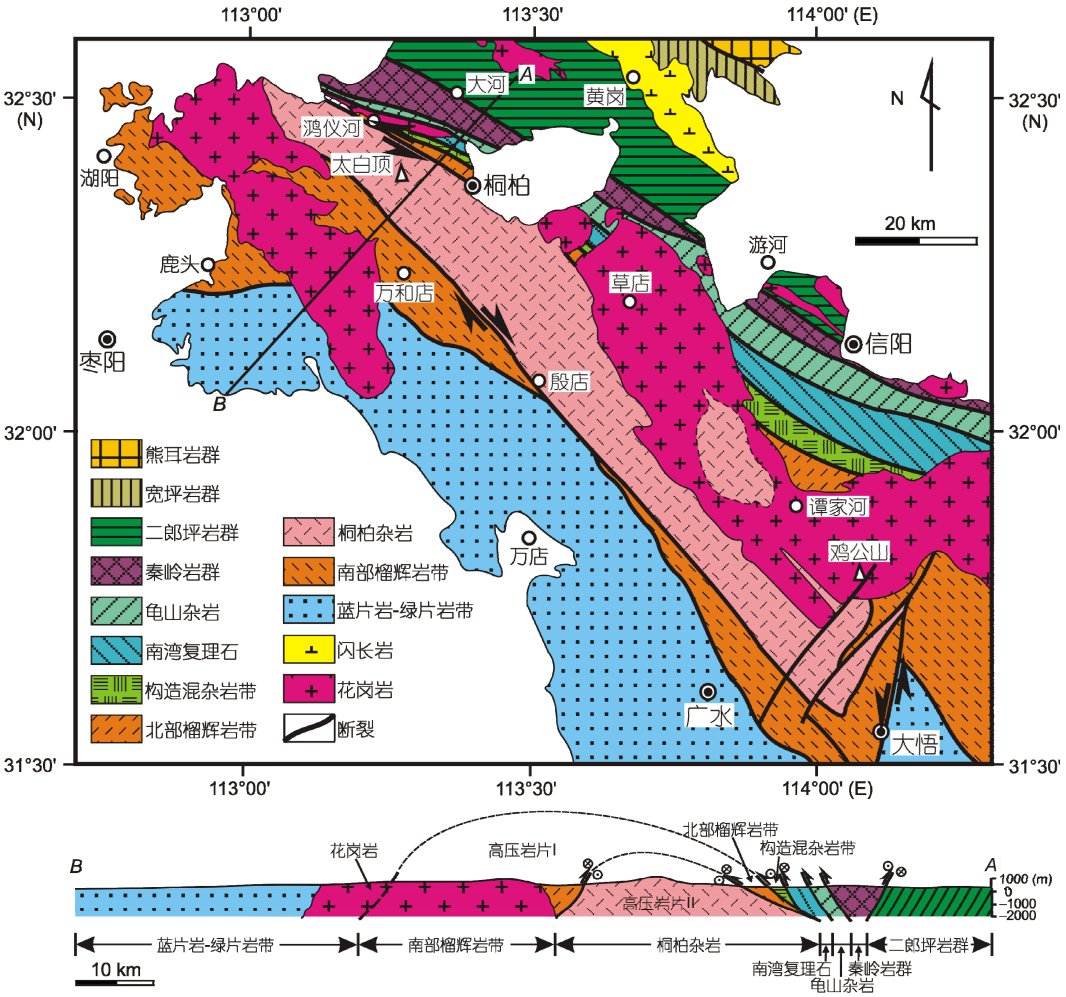

图 1 桐柏造山带地质简图及示意性剖面图(据文献[14]修改)

同一个高压岩片的不同部位. 在高压岩片Ⅰ中已获得 255±6 和 257±16 Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 252.3±3.4 和 256.4±2.6 Ma 的石榴石-全岩 Lu-Hf 等时线年龄, 以及 253±11 Ma 的矿物-全岩 Rb-Sr 等时线年龄[13,20]. 由于所测定的锆石区域含有榴辉岩相变质矿物, 并且石榴石中也见绿辉石包裹体, 因此我们将~255 Ma 解释为榴辉岩相峰期变质作用年龄. 对榴辉岩的围岩-片麻岩中白云母进行了 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年, 获得的 4 个样品年龄结果分别为 238±2, 238±2, 234±2 和 217±1 Ma[13], 应代表碰撞造山作用过程中变质白云母冷却至 Ar 扩散封闭温度(~350℃)的年龄.

高压岩片Ⅱ以桐柏杂岩中的变质岩包体为代表. 桐柏杂岩构成桐柏山背形构造的核部, 其北、南两侧分别以左行和右行韧性剪切带与北、南榴辉岩带相隔. 杂岩的主体是一套强变形的粗粒花岗质岩石(~80%), 其内发育一系列规模不等的变质岩包体(~20%), 以细粒 TTG 质正片麻岩、副片麻岩和斜长角闪岩为主, 含少量大理岩和钙硅酸盐岩, 局部见退变榴辉岩露头. 根据传统的地质温压计获得角闪岩相退变质条件为 660~700℃和 0.80~1.03 GPa, 而由变质相关系推测榴辉岩相的 *P-T* 范围应位于<700℃和>1.2 GPa 区域内[14]. 锆石 U-Pb 年代学研究揭示, 变质火成岩包体的原岩主要形成于 933~742 Ma, 主期变质作用发生在 232±6~220±3 Ma, 而变形花岗岩的侵位时代为~140 Ma[14]. 各种片麻岩中角闪石和多数白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄范围为 135~119 Ma, 而黑云母和个别白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄集中在 99~92 Ma[21~23], 可能暗示桐柏杂岩在白垩纪经历了两次幕式加热过程.

蓝片岩-绿片岩带位于南部榴辉岩带南侧, 北界为韧性剪切带, 南测以襄樊-广济断裂为界与华南陆块呈构造接触. 该带下部主要由新元古代基性-酸性双峰式变质火山沉积岩系组成, 上部则为绿片岩、白(绢)云母片岩、白云石英片岩与大理岩互层, 并构成一个宽缓的向斜. 蓝片岩相变质作用的 *P-T* 条件为 350℃和 0.7 GPa, 并普遍存在由蓝片岩相向绿片岩相的转变[24]. 目前在蓝片岩-绿片岩带中尚未获得变质年龄数据, 但在其东延的红安造山带蓝片岩带中获得了 231±1 Ma 的多硅白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄[25].

2 横向穿时性-同俯冲拆离/折返模型

高压岩片Ⅰ中~255 Ma 的年龄是截止目前在桐柏-大别-苏鲁高压/超高压变质带中获得的最老的高压变质年龄数据, 由此限定华北与华南陆块的碰撞及伴随的陆壳俯冲至少起始于晚二叠世. 这一结论得到如下两个证据的支持: (1) 在红安造山带北部熊店及其附近榴辉岩中获得的石榴石-全岩 Lu-Hf 和 Sm-Nd 等时线年龄或石榴石-绿辉石结线年龄集中在 271~252 Ma[26~29], 明显晚于~315 Ma 的变质锆石 U-Pb 年龄[27,30~32], 推测这些石炭纪变质的洋壳属性榴辉岩又遭受到晚二叠世陆壳俯冲作用的影响; (2) 我们最近在河南信阳南部叶家湾南湾复理石的变质砂岩(样品 XY24-1, 位置 31°59′52″N, 114°05′02″E)中获得了 261.5±1.6 Ma 的白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄(表 1, 图 2), 与前人[33~35]在大别造山带北麓佛子岭群中获得的白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄(271~261 Ma)基本吻合. 这两个地层单元可能同属晚古生代末期华南陆块北向俯冲过程中刮削下来的构造加积楔[36,37], 对应于俯冲带上盘的增生杂岩[38]. 考虑到熊店洋壳型榴辉岩及其上覆龟山杂岩所反映的洋壳俯冲发生在 340~310 Ma[39], 而陆壳深俯冲的起始时间不晚于~255 Ma, 因此我们认为从洋壳俯冲转换为陆壳俯冲的持续时间可能约 60 Myr (图 3(a)~(b)).

更为重要的是, 高压岩片Ⅰ中白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年反映, 高压岩石在受到晚二叠世变质后冷却至~350℃的年龄为~238 Ma. 这一年龄老于高压岩片Ⅱ的变质时代 232~220 Ma, 说明当高压岩片Ⅱ被俯冲到地壳深处并经受高压变质时, 其上覆的高压岩片Ⅰ已经折返到中上地壳的水平. 显然, 俯冲大陆地壳在深部发生了拆离. 普通 Pb 同位素地球化学研究表明, 高压岩片Ⅱ中的 Pb 同位素比值高于北大别杂岩, 而低于中大别超高压岩石[40], 大致相当于中地壳岩石, 因此这两个岩片的拆离似应发生在中地壳与上地壳之间. 另一方面, 高压岩片Ⅰ北侧的绿片岩相构造混杂岩带中白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 256±1 Ma[19], 应代表另一个先期就位于上地壳深度的低级变质岩. 这套岩石不代表一个完整的构造岩片, 且在红安定远一带有早古生代火山岩产出[41], 具有构造混杂的性质. 如前所述, 高压/超高压岩片的同俯冲拆离/折返在红安-大别-苏鲁造山带均已被识别[8,12], 但俯冲陆块在中下地壳深度的拆离似乎在桐柏地区表现得更为突出. 根据大陆俯冲隧道模型[42], 在大陆岩石圈俯冲过程中地壳岩片可以在不同深度(盖层/基底、上/中地壳、中/下地壳、壳幔边界)发生拆离后进入俯冲隧道, 在受到不同程度变质变形的同时沿俯冲隧

表 1 南湾复理石变质砂岩(样品 XY24-1)中白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素分析 a)

加热阶段	T(℃)	$(^{40}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{36}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{37}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{38}Ar/^{39}Ar)_m$	^{40}Ar(%)	F	^{39}Ar ($\times10^{-14}$mol)	^{39}Ar(累积)(%)	年龄(Ma)	±1 s (Ma)
1	700	17.8654	0.0096	0.0000	0.0141	84.01	15.009	0.31	0.53	209.9	3.8
2	800	20.0199	0.0051	0.0594	0.0142	92.52	18.524	1.13	2.48	255.6	2.5
3	850	19.3101	0.0011	0.0000	0.0125	98.27	18.976	2.84	7.37	261.5	2.4
4	900	19.3174	0.0010	0.0000	0.0125	98.43	19.015	8.77	22.49	262.0	2.4
5	950	19.0761	0.0004	0.0033	0.0124	99.34	18.949	16.3	50.60	261.1	2.4
6	980	19.0711	0.0004	0.0005	0.0123	99.38	18.952	5.39	59.90	261.2	2.4
7	1020	19.1622	0.0008	0.0170	0.0125	98.77	18.926	3.22	65.45	260.8	2.4
8	1060	19.1930	0.0009	0.0154	0.0125	98.64	18.932	4.01	72.37	260.9	2.4
9	1100	19.1164	0.0004	0.0107	0.0124	99.35	18.992	6.92	84.31	261.7	2.4
10	1140	19.1292	0.0003	0.0176	0.0124	99.55	19.043	7.66	97.52	262.3	2.4
11	1180	19.1687	0.0005	0.0000	0.0123	99.20	19.015	1.32	99.80	262.0	2.5
12	1300	21.3820	0.0017	0.2287	0.0142	97.66	20.886	0.12	100.00	285.8	8.6

a) 中国地质科学院地质研究所同位素实验室分析. 样品重量 W=29.60 mg, 照射参数 J=0.008219. 下标 m 代表样品中测定的同位素比值, $F=^{40}Ar^{*}/^{39}Ar$

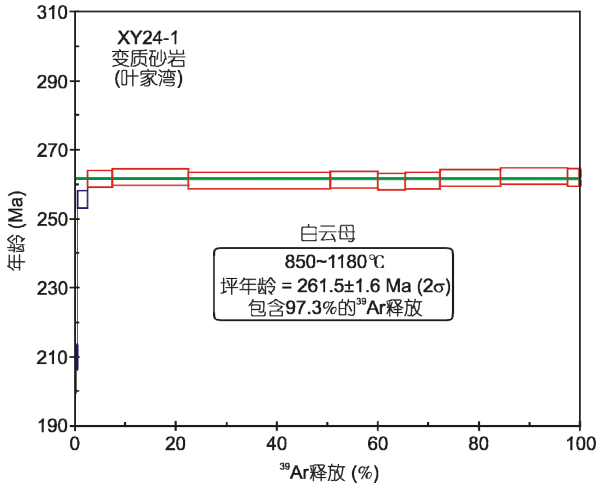

图 2 南湾复理石变质砂岩中白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄

道依次折返. 由此可见, 同俯冲拆离/折返可能是桐柏-红安-大别-苏鲁造山带中低压/高压/超高压岩石得以折返并保存的主要动力学机制(图 3(b), (c)), 而其最终出露于地表则归因于白垩纪的构造伸展事件(图 3(d))[23].

就高压岩片 I 以南的以蓝片岩-绿片岩带为代表的低温高压岩片来说, 这一岩片向东一直延伸到红安-大别造山带, 连续性较好. 这套层位性较好的变质火山沉积岩系可能代表俯冲华南陆壳北缘的表层岩石, 在红安南部以向南倾斜为主[4], 在桐柏南部则具有向南逆冲的性质[43]. 因此, 在我们的构造模型中将其作为由北部缝合线挤出的推覆体来处理[5,38], 代表另一个早期拆离的岩片. 然而, 由于在缝合线附近并未找到与其对应的残存岩石, 所以其相对构造位置尚难以确定. 我们将其置于高压岩片 I 之上, 缘于二者的直接接触关系以及岩石组合和变质温压环境的吻合性, 但需要对其变质时代进行检验. 如果桐柏蓝片岩-绿片岩带可以与其东向延伸的红安造山带蓝片岩类比的话, 推测两者的形成机制与大别造山带南麓的宿松群蓝片岩一致, 均属于华南陆块表壳岩石俯冲变质产物[12].

3 纵向穿时性-翘翘板式俯冲/折返模型?

一般认为, 桐柏高压变质地体是红安-大别高压/超高压变质地体的西延部分, 除缺失超高压变质单元外, 其他主要构造单元(岩片)可与之一一对应. 然而, 精细的同位素年代学研究发现, 两地相似岩片的变质年代实际上也存在系统的差别. 前已述及, 桐柏造山带高压岩片 I 的变质年龄为~255 Ma[13,20]. 在与桐柏北部榴辉岩带相当的红安造山带浒湾榴辉岩带中, 斜长角闪岩和富石英淡色体中变质锆石给出的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分别为 243±4 和 241±1 Ma[44], 这些变质锆石中含有石榴石和绿辉石包裹体, 并具有平坦的 HREE 配分型式和较弱的 Eu 负异常, 表明它们形成于榴辉岩相变质条件下. 在与桐柏南部榴辉岩带相当的红安榴辉岩带中也获得了 3 个石榴石-全岩

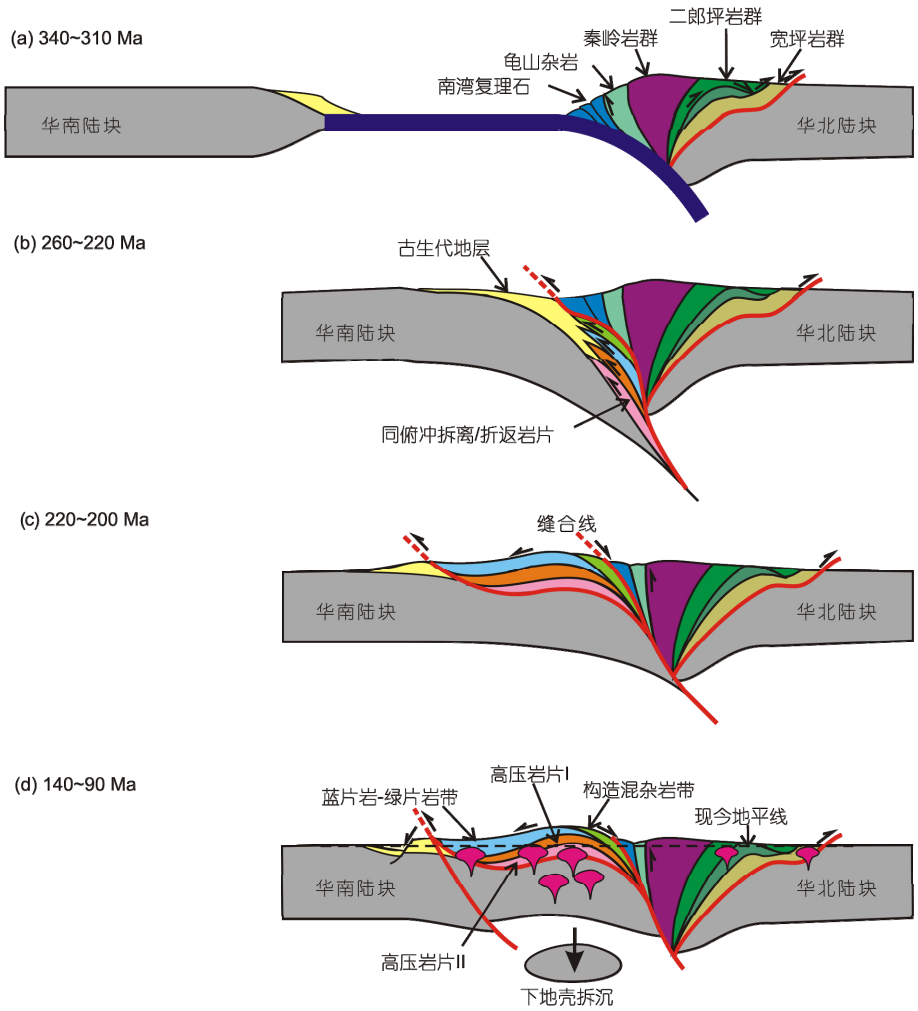

图 3　桐柏造山带晚古生代-中生代从大洋俯冲/增生到陆陆碰撞的构造演化示意图(据文献[38]修改)

Lu-Hf 等时线年龄，分别为 243.3±4.1，240.7±1.2 和 238.3±1.2 Ma[45]. 显然，在红安造山带超高压岩片之上的高压岩片应形成于~240 Ma，晚于桐柏造山带的高压岩片Ⅰ约 15 Myr. 在浒湾榴辉岩带北侧的八里畈构造混杂岩带中，白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 242±2 Ma[25]，也晚于桐柏地区相同构造单元约 15 Myr. 这说明，至少在桐柏-红安造山带中未经历超高压变质的岩片于平行造山带的方向上也具有穿时性.

在大别造山带中部和南部超高压榴辉岩相变质岩中，245~240 Ma 和 225~220 Ma 这两组锆石 U-Pb 年龄都很常见[46~49]. 一般将前者解释为大陆俯冲过程中由高压条件向超高压条件转换所对应的变质脱水事件年龄，将后者解释为深俯冲大陆地壳折返过程中由超高压条件向高压条件转换所对应的变质脱水事件年龄[42,50]，而真正的峰期超高压变质事件年龄可能在 238~235 Ma[12]. 大别造山带北部岩石经历超高压榴辉岩相变质事件的年龄则相对年轻，主要集中在 226~214 Ma[7,51]. 北大别岩片显示变质核杂岩的特点[52]，与桐柏杂岩具有一定的可比性. 对大别造山带地壳结构的恢复指示，北大别岩片在三叠纪大陆俯冲时位于中大别岩片之下，而南大别岩片位于中大别岩片之上[53,54]. 如果将桐柏杂岩中高压岩片Ⅱ的变质时代 232~220 Ma[14]与北大别岩片相比，二者在峰期变质条件上存在显著差异，但是在高压/超高压变质时代上差别不大.

如何理解同一岩片变质作用在造山带纵向上的穿时性？一种可能的解释是，俯冲陆壳由于被动边缘凹凸程度的影响而在不同地区发生了不等时的俯冲/碰撞及其相应的变质作用. 具体来说，华南与华北陆块在晚二叠-三叠纪时期的碰撞可能起始于西部

的桐柏地区, 向东陆间盆地在约 15 Myr 之后才最后关闭, 这实际上是一种逆时针剪刀式穿时碰撞模式. 这种碰撞模型不同于前人根据古地磁数据建立的苏鲁-大别-秦岭顺时针剪刀式穿时碰撞模型[55,56]. 在这一模型中, 东西对应的高压岩片并非严格意义上的同一构造岩片, 而是性质相似但已发生拆离的两个岩片. 如果它们属于同一构造岩片, 那似乎可以采用翘翘板式(seesaw-type)俯冲/折返模式来解释, 即高压岩片西部在~255 Ma 首先被俯冲到地壳深处, 此时在红安地区的同一岩片尚位于浅部, 而后当岩片东部在~240 Ma 发生俯冲时, 岩片西部已被抬升到中上地壳水平. 同样, 构造混杂岩带也于这两个时期分别在桐柏和红安地区就位于上地壳深度. 俯冲岩板的角度向东逐渐变陡可能是这种翘翘板式俯冲/折返得以发生的主要诱因. 这一模型也可以解释为什么华南大陆板片的俯冲向西变浅, 以至于在桐柏地区已无超高压变质岩片产出[14]. 但在大陆俯冲/碰撞的晚期, 岩片在纵向上的穿时性特征已不明显, 只保持东深西浅的俯冲样式.

4 结论

大陆俯冲岩板的穿时性是桐柏-红安-大别-苏鲁高压/超高压变质地体的最重要特征之一, 并且在世界上其他规模较大的高压/超高压变质带(如西阿尔卑斯)中也可能具有普遍性. 同俯冲拆离/折返的构造模型能够合理地解释红安-大别-苏鲁造山带不同高压/超高压岩片的变质时差, 桐柏造山带高压变质地体的同位素年代学结构为这一构造模型提供了进一步的支持. 不仅如此, 同一岩片在造山带纵向上似乎也存在穿时性, 这对认识高压/超高压岩石的俯冲和折返机制可能具有重要的启示. 本文初步设想了一个翘翘板式俯冲/折返模型来解释这种差异, 但这个模型与大陆俯冲隧道模型之间的关系需要进一步研究工作来认识和检验.

致谢 郑永飞教授和林伟研究员对本文提出了建设性修改意见, 并增补了相关论述、文献, 进行了文字润色, 在此深表谢意!

参考文献

1 Chopin C. Very-high-pressure metamorphism in the West Alps: Implications for subduction of continental crust. Phil Trans R Soc Lond, 1987, A321: 183–197
2 Schreyer W. Subduction of continental crust to mantle depths: Petrological evidence. Episodes, 1988, 11: 97–104
3 刘晓春, 胡克. 超高压变质作用. 地质科技情报, 1991, 10: 17–23
4 Liu X C, Wei C J, Li S Z, et al. Thermobaric structure of a traverse across western Dabieshan: Implications for collision tectonics between the Sino-Korean and Yangtze cratons. J Metamorph Geol, 2004, 22: 361–379
5 Liu X C, Jahn B M, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of a metagabbro and eclogites from western Dabieshan (Hong'an block), China, and its tectonic implications. Tectonophysics, 2004, 394: 171–192
6 李曙光, 李秋立, 侯振辉, 等. 大别山超高压变质岩的冷却史及折返机制. 岩石学报, 2005, 21: 1117–1124
7 Liu Y C, Li S G, Xu S T. Zircon SHRIMP U-Pb dating for gneisses in northern Dabie high T/P metamorphic zone, central China: Implications for decoupling within subducted continental crust. Lithos, 2007, 96: 170–185
8 刘贻灿, 李曙光. 俯冲陆壳内部的拆离和超高压岩石的多板片差异折返: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 2008, 53: 2153–2174
9 许志琴, 曾令森, 梁凤华, 等. 大陆板片多重性俯冲与折返的动力学模式——苏鲁高压-超高压变质地体的折返年龄限定. 岩石矿物学杂志, 2005, 24: 357–368
10 Xu Z Q, Zeng L S, Liu F L, et al. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-oressure-ultrahigh-pressure metamorphic terrane. Geol Soc Am Spec Pap, 2006, 403: 93–113
11 Liu F L, Gerdes A, Xue H M. Differential subduction and exhumation of crustal slices in the Sulu HP-UHP metamorphic terrane: Insights from mineral inclusions, trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotope analyses of zircon in orthogneiss. J Metamorph Geol, 2009, 27: 805–825
12 郑永飞. 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
13 Liu X C, Jahn B M, Dong S W, et al. High-pressure metamorphic rocks from Tongbaishan, central China: U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ age constraints on the provenance of protoliths and timing of metamorphism. Lithos, 2008, 105: 301–318
14 Liu X C, Jahn B M, Cui J J, et al. Triassic retrograded eclogites and Cretaceous gneissic granites in the Tongbai Complex, central China: Implications for the architecture of the HP/UHP Tongbai-Dabie-Sulu collision zone. Lithos, 2010, 119: 211–237

15 刘晓春, 江博明, 李三忠, 等. 桐柏高压变质地体: 对桐柏-大别-苏鲁高压/超高压变质带构造框架和俯冲/折返机制的制约. 岩石学报, 2011, 27: 1151–1162
16 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L E, et al. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. J Geophys Res, 2000, 105: 13339–13364
17 刘贻灿, 李曙光, 古晓峰, 等. 北淮阳王母观橄榄辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 2006, 51: 2175–2180
18 刘贻灿, 刘理湘, 古晓峰, 等. 大别山北淮阳带西段新元古代浅变质花岗岩的发现及其大地构造意义. 科学通报, 2010, 55: 2391–2399
19 黄少英, 徐备, 王长秋, 等. 桐柏造山带几何学、运动学和演化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 242–251
20 Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. New Lu-Hf geochronology constraints the onset of continental subduction in the Dabie orogen. Lithos, 2011, 121: 41–54
21 Webb L E, Hacker B R, Ratschbacher L, et al. Thermochronologic constraints on deformation and cooling history of high- and ultrahigh-pressure rocks in the Qinling-Dabie orogen, eastern China. Tectonics, 1999, 18: 621–638
22 许光, 王二七. 桐柏杂岩的中生代隆升机制及其与南阳盆地沉降的耦合关系. 地质科学, 2010, 45: 626–652
23 Cui J J, Liu X C, Dong S W, et al. U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the Tongbai complex, central China: Implications for Cretaceous exhumation and lateral extrusion of the Tongbai-Dabie HP/UHP terrane. J Asian Earth Sci, 2012, 47: 155–170
24 刘晓春, 康维国, 周高志, 等. 桐柏山-大别山南缘蓝片岩主要矿物研究及变质作用演化. 长春地质学院学报, 1989, 19: 41–56
25 Li S Z, Kusky T M, Zhao G C, et al. Thermochronological constraints on two-stage extrusion of HP/UHP terranes in the Dabie-Sulu orogen, east-central China. Tectonophysics, 2011, 504: 25–42
26 Jahn B M, Liu X C, Yui T F, et al. High-pressure/ultrahigh-pressure eclogites from the Hong'an Block, east-central China: Geochemical characterization, isotope disequilibrium and geochronological controversy. Contrib Mineral Petrol, 2005, 149: 499–526
27 Cheng H, King R L, Nakamura E, et al. Transitional time of oceanic to continental subduction in the Dabie orogen: Constraints from U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd and Ar-Ar multichronometric dating. Lithos, 2009, 110: 327–342
28 Cheng H, Du Frane S A, Vervoort J D, et al. Protracted oceanic subduction prior to continental subduction: New Lu-Hf and Sm-Nd geochronology of oceanic-type high-pressure eclogite in the western Dabie orogen. Am Mineral, 2010, 95: 1214–1223
29 Cheng H, Zhang Z, Vervoort J D, et al. New Lu-Hf and Sm-Nd geochronology constraints the subduction of oceanic crust during the Carboniferous-Permian in the Dabie orogen. J Asian Earth Sci, 2013, 63: 139–150
30 Sun W D, Williams I S, Li S G. Carboniferous and Triassic eclogites in the western Dabie Mountains, east-central China: Evidence for protracted convergence of the North and South China Blocks. J Metamorph Geol, 2002, 20: 873–886
31 Wu Y B, Hanchar J M, Gao S, et al. Age and nature of eclogites in the Huwan shear zone, and the multi-stage evolution of the Qinling-Dabie-Sulu orogen, central China. Earth Planet Sci Lett, 2009, 277: 345–354
32 Liu X C, Wu Y B, Gao S, et al. Zircon U-Pb and Hf evidence for coupled subduction of oceanic and continental crust during the Carboniferous in the Huwan shear zone, western Dabie orogen, central China. J Metamorph Geol, 2011, 29: 233–249
33 牛宝贵, 富云莲, 刘志刚, 等. 桐柏-大别山主要构造热事件及 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 地质定年研究. 地球学报, 1994, 15: 20–34
34 Faure M, Lin W, Schärer U, et al. Continental subduction and exhumation of the UHP rocks: Structural and geochronological insights from the Dabieshan (East China). Lithos, 2003, 70: 213–241
35 Ratschbacher L, Franz L, Enkelmann E, et al. The Sino-Korean-Yangtze suture, the Huwan detachment, and the Paleozoic-Tertiary exhumation of (ultra)high-pressure rocks along the Tongbai-Xinxian-Dabie Mountains. In: Hacker B R, McClelland W C, Liou J G, eds. Ultrahigh-pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction. Geol Soc Am Spec Pap, 2006, 403: 45–75
36 周建波, 郑永飞, 李龙, 等. 扬子板块俯冲的构造加积楔. 地质学报, 2001, 75: 338–352
37 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
38 Liu X C, Jahn B M, Li S Z, et al. U-Pb zircon age and geochemical constraints on tectonic evolution of the Paleozoic accretionary orogenic system in the Tongbai orogen, central China. Tectonophysics, 2013, 599: 67–88
39 Liu X C, Jahn B M, Hu J, et al. Metamorphic patterns and SHRIMP zircon ages of medium-to-high grade rocks from the Tongbai orogen, central China: Implications for multiple accretion/collision processes prior to terminal continental collision. J Metamorph Geol, 2011, 29: 979–1002
40 Zhang H F, Zhang B, Zhong Z Q, et al. Pb isotopic geochemical study on the crustal structure of Tongbai Shan. Prog Nat Sci, 2003, 13: 63–68
41 Li S G, Han W, Huang F, et al. Sm-Nd and Rb-Sr ages and geochemistry of volcanics from the Dingyuan formation in Dabie Mountains, central China: Evidence to the Paleozoic magmatic arc. Sci Geol Sin, 1998, 7: 461–470
42 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chem Geol, 2012, 328: 5–48

43 Liu X, Li S Z, Suo Y H, et al. Structural anatomy of the exhumation of high-pressure rocks: Constraints from the Tongbai Collisional Orogen and surrounding units. Geol J, 2011, 46: 156–172
44 Liu X C, Wu Y B, Gao S, et al. Triassic high-pressure metamorphism in the Huwan shear zone: Tracking the initial subduction of continental crust in the whole Dabie orogen. Lithos, 2012, 136-139: 60–72
45 Cheng H, DuFrane S A, Vervoort J D, et al. The Triassic age for oceanic eclogites in the Dabie orogen: Entrainment of oceanic fragments in the continental subduction. Lithos, 2010, 117: 82–98
46 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
47 Liu F L, Gerdes A, Liou J G, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating from Sulu-Dabie dolomitic marble, eastern China: Constraints on prograde, ultrahigh-pressure and retrograde metamorphic ages. J Metamorph Geol, 2006, 24: 569–589
48 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
49 Liu F L, Liou J G. Zircon as the best mineral for P-T-time history od UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U-Pb SHRIMP ages of zircons from the Dabie-Sulu UHP rocks. J Asian Earth Sci, 2011, 40: 1–39
50 Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. Tectonophysics, 2009, 475: 327–358
51 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
52 林伟, 王军, 刘飞, 等. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. 岩石学报, 2013, 29: 1791–1810
53 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Zircon U-Pb ages, Hf and O isotopes constrain the crustal architecture of the ultrahigh-pressure Dabie orogen in China. Chem Geol, 2008, 253: 222–242
54 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Origin of postcollisional magmatic rocks in the Dabie orogen: Implications for crust-mantle interaction and crustal architecture. Lithos, 2011, 126: 99–114
55 Zhao X X, Coe R S. Paleomagnetic constraints on the collision and rotation of north and south China. Nature, 1987, 327: 141–144
56 Enkin R J, Courtillot V, Leloup P, et al. The paleomagnetic record of Uppermost Permian, Lower Triassic rocks from the South China Block. Geophys Res Lett, 1992, 19: 2147–2150