科学通报 2013 年 第 58 卷 第 22 期：2113 ~ 2123
进 展 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质作用研究新进展

刘良*, 曹玉亭, 陈丹玲, 张成立, 杨文强, 康磊, 廖小莹

大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069
* 联系人, E-mail: liuliang@nwu.edu.cn

2013-05-27 收稿, 2013-06-14 接受, 2013-07-29 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2009CB825003)、国家自然科学基金(40972128, 40902022)和大陆动力学国家重点实验室自主研究重点课题资助

摘要 通过详细的野外地质和室内研究, 进一步查明了南阿尔金和北秦岭构造带中高压-超高压变质岩的类型和时空分布规律, 尤其是确定北秦岭高压-超高压岩石不仅分布在秦岭岩群北缘, 而且断续出露在秦岭岩群中部或偏南侧的东西一线. 结合岩相学观察和实验岩石学资料, 确定南阿尔金榴辉岩中存在斯石英假象, 确定北秦岭长英质片麻岩中石榴子石出溶石英+金红石+磷灰石前的稳定压力大于 10 GPa. 细致的岩相学研究揭示, 南阿尔金与北秦岭超高压岩石在峰期变质之后又主体经历了两期退变质作用的叠加和改造, 表明其经历了由陆壳俯冲-深俯冲、之后连续两次抬升的构造演化过程. 年代学研究表明两地高压-超高压岩石的原岩形成时代均为新元古代、峰期变质时代为~500 Ma 和退变质时代为~450 和~420 Ma. 南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质岩带有几乎相同的峰期变质时代、退变质时代与花岗质岩浆活动的期次和时代, 均早于柴北缘约 30~80 Ma. 因此, 这三地不能构成同一条高压-超高压岩带, 其形成可能是早古生代时期多陆块不同时俯冲-碰撞的产物. 同时, 结合区域地质资料综合分析, 初步认为南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质岩带的形成, 可能分别是南阿尔金洋向北俯冲拖曳其南侧的亲扬子地块属性的部分新元古代陆壳物质、以及商丹洋向北俯冲拖曳南秦岭部分新元古代陆壳物质在~500 Ma 发生陆壳俯冲-深俯冲作用的产物.

关键词
高压-超高压变质作用
陆壳超深俯冲
锆石 U-Pb 定年
多期变质时代
南阿尔金与北秦岭

高压-超高压变质作用是近30年来国际地质学界持续研究的热点与前缘[1]. 高压-超高压变质带记录了地壳物质从俯冲到折返的动力学全过程[2~9], 是古板块汇聚边界及古板块俯冲和大陆碰撞的重要标志. 尽管高压-超高压变质岩在板块俯冲、碰撞形成的造山带中的出露仅占很小的比例, 但却包含俯冲过程及造山带形成与演化的重要信息. 因此, 细致地研究查明造山带中高压-超高压变质岩的类型、原岩属性, 时、空分布规律及其原岩、峰期变质和退变质时代, 对深入理解造山带形成与演化过程具有十分重要的意义.

近 10 多年来, 伴随世界范围超高压变质作用研究的不断深入, 我国中西部北秦岭[10~13]、南阿尔金[14~20]及柴北缘[20~28]等地陆续确定了一系列高压-超高压变质岩石, 并确定其主体是早古生代陆壳深俯冲作用的产物, 部分岩石代表的俯冲深度可达>200 或>350 km 的地幔深度[14~17]. 这些研究已在国内外学术界引起强烈反响[29,30], 我国中西部已成为继苏鲁-大别之后国际超高压变质作用研究的又一热点地区.

本文总结了近年来南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质作用研究方面取得的新进展, 重点包括: (1)

引用格式: 刘良, 曹玉亭, 陈丹玲, 等. 南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质作用研究新进展. 科学通报, 2013, 58: 2113–2123
Liu L, Cao Y T, Chen D L, et al. New progresses on the HP-UHP metamorphism in the South Altyn Tagh and the North Qinling. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2113–2123, doi: 10.1360/972013-613

高压-超高压岩石的空间分布; (2) 陆壳岩石超深(>9 GPa)俯冲与折返的岩石学新证据; (3) 高压-超高压岩石的变质期次及其演化; (4) 高压-超高压岩石的变质、退变质与原岩形成时代; (5) 南阿尔金、柴北缘与北秦岭三地高压-超高压变质岩带的对比. 在此基础上, 并结合区内先期相关研究成果, 试图为进一步探讨南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质岩带的多期变质演化历史和重建其早古生代的构造演化过程提供约束条件.

1 高压-超高压岩石的空间分布

南阿尔金高压-超高压变质带位于阿尔金走滑断裂带以北, 高压-超高压变质岩石主要呈透镜体状分布在西段江尕勒萨依、中段英格利萨依和淡水泉 3 个地区的阿尔金岩群之中(图 1). 目前已确定的超高压岩石主要有榴辉岩、含蓝晶石石榴子石泥质片麻岩、含菱镁矿的石榴二辉橄榄岩、含钾长石的石榴子石辉石岩和含石榴子石花岗质片麻岩等 5 种类型[14~17,19,31], 高压岩石主要为不同成分的高压麻粒岩相岩石[32]. 最近, 又在南阿尔金高压-超高压变质带西侧的木纳布拉克地区发现高压泥质麻粒岩[33], 在淡水泉一带发现石榴子石辉石岩[34]. 由此可见, 区内高压-超高压岩石由西向东断续出露在阿尔金岩群之中, 共同构成同一条变质杂岩带.

早期的研究认为北秦岭榴辉岩仅产出在秦岭岩群的北缘官坡-双槐树一带, 而高压麻粒岩只发育在秦岭岩群南侧的松树沟一带(图 2). 但伴随研究程度的不断深入, 相继确定官坡榴辉岩及其围岩和松树沟长英质高压麻粒岩经历了超高压变质[12,13], 尤其重要的是新近在秦岭岩群南部清油河一带发现了退变榴辉岩[36], 在寨根北和西峡北又分别确定了石榴石辉石岩和榴闪岩[37], 因此, 区内高压-超高压岩石不仅分布在秦岭岩群北缘的官坡一带, 而且断续出露在秦岭岩群中部或偏南侧的清油河北-松树沟-寨根北甚至西峡北东西一线, 进一步表明北秦岭高压-超高压岩石可能共同构成同一条变质杂岩带.

2 陆壳超深(>9 GPa)俯冲与折返的岩石学新证据

在南阿尔金超高压榴辉岩的绿辉石和石榴子石中发现了由多晶石英集合体组成的长柱状集合体, 其中绿辉石中这种长柱状集合体的长宽比可达 38:1 (图 3(a)). 这种长柱状多晶石英集合体与超高压岩石中见到的短柱状或浑圆状的柯石英假象明显不同, 也不同于常见矿物出溶结构中出溶矿物片晶或棒状体成群或多组断断续续有规律出现在寄主矿物中的

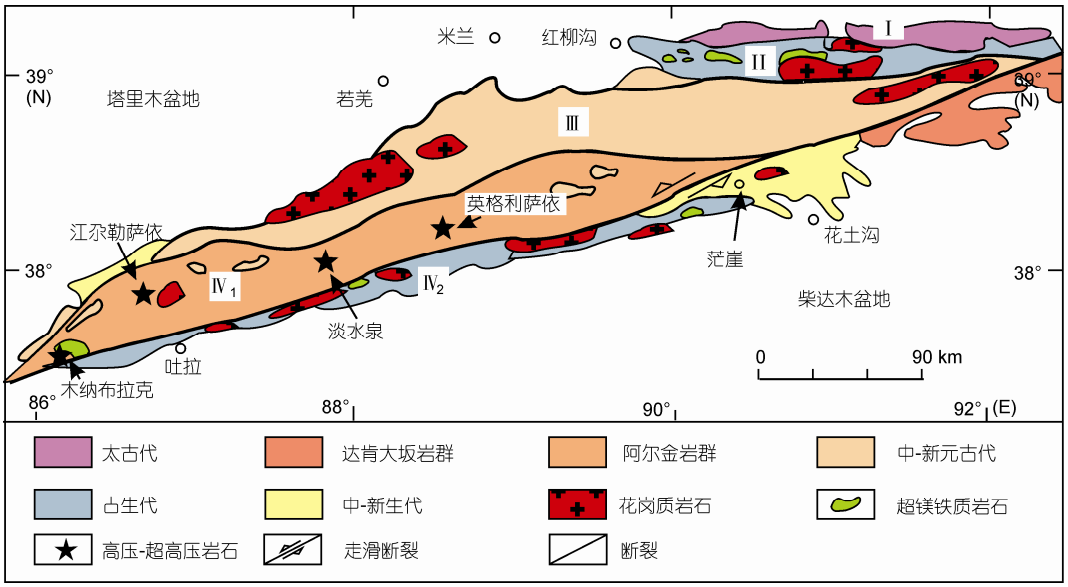

图 1 阿尔金造山带地质构造简图与南阿尔金高压-超高压岩石的分布

据 Liu 等人[14]修改. Ⅰ, 北阿尔金太古代混杂岩带; Ⅱ, 北阿尔金俯冲碰撞杂岩带; Ⅲ, 米兰河-金雁山地块; Ⅳ, 南阿尔金俯冲碰撞杂岩带; $Ⅳ_1$, 南阿尔金高压-超高压变质带; $Ⅳ_2$, 南阿尔金蛇绿构造混杂岩带

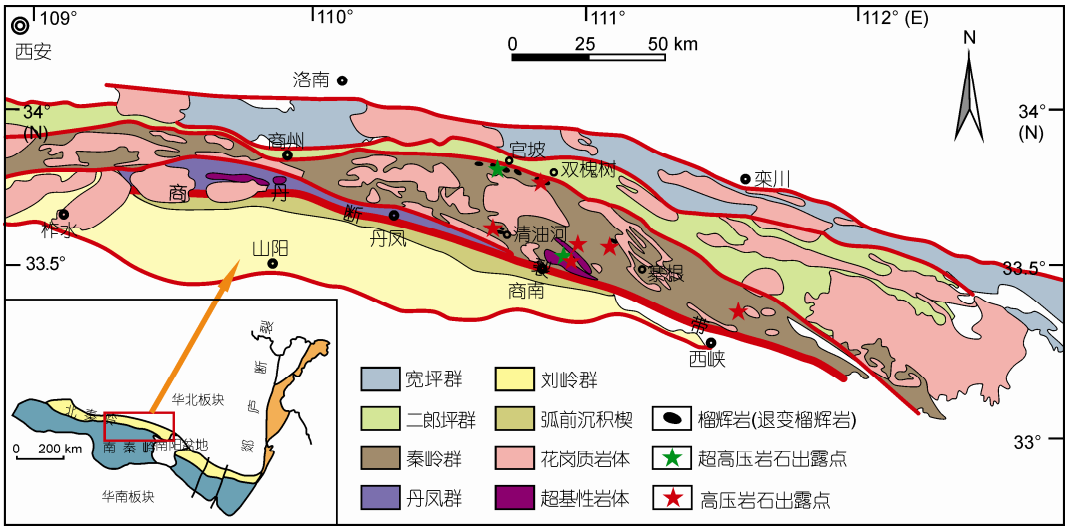

图 2　北秦岭构造地质简图与高压-超高压岩石的出露位置

据 Wang 等人[35]修改

结构特征[38]. 柯石英为单斜晶系, 结构中 Si–O 四面体共角顶连接形成架状结构, 故结晶习性通常呈短柱状或板柱状; 而斯石英为四方晶系, 具金红石型结构, 结构中 Si–O 八面体共棱连接沿 c 轴形成链状结构, 因而结晶习性呈柱状或长柱状. 另外, 实验合成的斯石英与柯石英的形态分别为长柱状和短柱状[17]; 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中发现的斯石英假象呈长柱状[39]. 因此, 南阿尔金榴辉岩中这种呈长柱状的多晶石英集合体应解释为斯石英假象, 即其经历了由斯石英→柯石英→石英的转变过程, 结合实验岩石学资料[40,42], 进而可确定南阿尔金超高压榴辉岩的峰期压力为 8~10 GPa. 同时, 通过对长英质(泥质)体系高温高压实验(P=6~12 GPa, T= 1200~1400℃样品进行精细的矿物成分分析测试, 并结合前人已发表的高温高压实验数据[40~43], 初步确定在含 SiO_2 独立矿物相(柯石英或斯石英)的体系中, 石榴子石超 Si 的最小压力主体是在≥10 GPa 的斯石英稳定域. 以这一认识为依据, 在进一步确定北秦岭长英质片麻岩中石榴子石出溶石英＋金红石＋磷灰石、尤其是石榴子石出溶石英棒状体显微结构分析的基础上, 初步确定该岩石的峰期压力大于 10 GPa 进入斯石英稳定域, 指示该岩石俯冲深度大于 300 km[44]. 结合早前南阿尔金变沉积岩中斯石英出溶显微结构证据的已有研究[17], 共同表明大陆岩石俯冲/折返深度大于 300 km 可能具有一定的普遍性.

3　高压-超高压岩石的变质期次及其演化

精细的岩石学研究表明, 南阿尔金与北秦岭高压-超高压岩石在峰期变质之后又主体经历了两期退变质作用的叠加和改造, 表明这些高压-超高压岩石经历了一个完整的由陆壳俯冲-深俯冲、之后连续两次抬升的构造演化过程.

南阿尔金超高压榴辉岩的绿辉石和石榴子石中含斯石英(图 3(a))和柯石英假象[45], 表明其经历了超高压变质, 峰期变质矿物组合为 Grt_1+Omp+Stv(斯石英)/Coe+Ru. 该岩石后期又遭受了两期退变质的叠加, 高压麻粒岩退变质以绿辉石退变为 $Cpx+Pl_1$ 后成合晶为特征(图 3(b)), 矿物组合为 $Grt+Cpx+Pl_1+Qz\pm$ Amp; 角闪岩相退变质以围绕 $Cpx+Pl_1$ 后成合晶外围生长的 $Amp+Pl_2$ 为代表(图 3(b)), 其矿物组合为 $Grt+Amp+Pl_2+Qz\pm Bi$[45]. 南阿尔金淡水泉高压麻粒岩的峰期矿物组合为 Grt+Ky+Kfs+Ru+Qz; 第一期退变质以蓝晶石退变为夕线石(图 3(c))为特征, 其矿物组合为 Grt+Sill+Kfs+Qz; 第二期退变质以石榴子石与钾长石发生反应退变生成黑云母(图 3(d))为代表, 矿物共生组合为 Grt+Kfs+Bt+Sill+Qz; 第三期退变阶段中蓝晶石/夕线石进一步退变生成白云母(图 3(c)), 矿物共生组合为 Bt+Sill+Mu+Qz[32].

北秦岭清油河退变榴辉岩的石榴石中发现残留的绿辉石包体[36], 以及呈残斑状产出的多硅白云母的 Si 值为 3.34~3.35[37], 一致表明该岩石早期曾经历

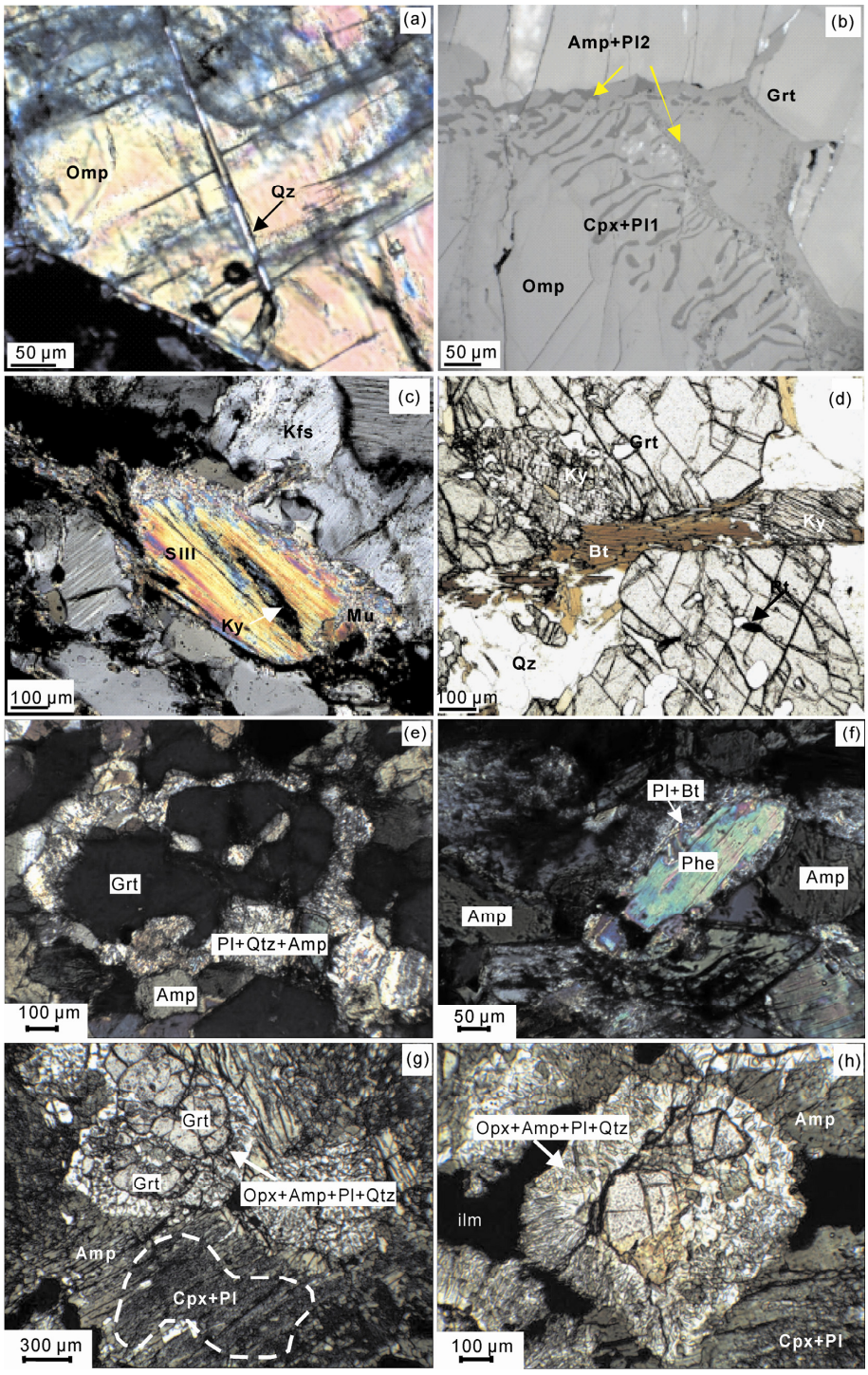

图 3 南阿尔金与北秦岭部分高压-超高压岩石的显微结构

Grt, 石榴子石; Omp, 绿辉石; Cpx, 单斜辉石; Opx, 斜方辉石; Amp, 角闪石; Pl, 斜长石; Kfs, 钾长石; Ky, 蓝晶石; Sill, 矽线石; Bt, 黑云母; Mu, 白云母; Phe, 多硅白云母; Qz, 石英

过榴辉岩相变质, 早期矿物组合可能为 Grt+Omp+Phe+Qz; 该岩石石榴石变斑晶外围明显可见由斜长石+石英+角闪石等矿物构成的后成合晶结构(图 3(e)), 多硅白云母边部退变成 Bt+Pl(图 3(f)), 可能代表了该榴辉岩的早期退变质作用. 基质中深绿色角闪石与斜长石平衡共生, 并围绕在石榴石和多硅白云母的

外围(图 3(e), (f)), 应为晚期角闪岩相退变质的产物. 岩相学观察可识别出寨根北石榴石辉石岩至少 3 期变质矿物组合, 早期主要为石榴子石和残留的单斜辉石(图 3(g)); 第二期中压麻粒岩相阶段矿物组合以石榴子石的后成合晶为代表, 主要由蠕虫状的 Opx + Amp + Pl + Qz 呈复杂的交生关系组成(图 3(g), (h)); 第三期矿物组合以分布在石榴石和单斜辉石外围的角闪石和斜长石为代表, 是该岩石后期角闪岩相退变质的产物.

4 高压-超高压岩石的变质、退变质与原岩形成时代

先期研究已表明南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质岩石的峰期变质时代分别约为 500 Ma[45,46], 但长期缺乏可靠退变质时代及其原岩形成时代的系统研究. 在岩相学观察和锆石 CL 图像研究的基础上, 利用 LA-ICP-MS 原位微区定年分析方法, 近年来进一步陆续分别确定南阿尔金与北秦岭不同类型高压-超高压变质岩的原岩形成时代分别为 563~857 和 573~843 Ma, 峰期变质时代分别为 480~505 和 485~514 Ma, 其中南阿尔金超高压榴辉岩和超高压泥质片麻岩的退变质时代分别为 455±2 和 448±3 Ma, 北秦岭部分高压-超高压岩石的两期退变质时代为~450 和~420 Ma(表 1, 2). 新确定的两地(南阿尔金与北秦岭)这些岩石的峰期变质时代与前人已报道的区内同一露头或其他露头的高压-超高压岩石的峰期变质时代在误差范围内基本一致(表 1, 2), 排除了分析误差与其他可能的不确定因素, 共同表明它们应是同一期构造地质事件的产物.

5 南阿尔金、柴北缘与北秦岭三地高压-超高压变质岩带的对比

较长时期以来, 关于中国中西部南阿尔金、柴北缘与北秦岭三地高压-超高压变质岩带之间相互关系的认识存在是否是中国南北两大板块俯冲碰撞产物的分歧[12,46,48,56]. 前已述及, 南阿尔金大陆俯冲-深俯冲作用形成的高压-超高压变质岩石的峰期变质时代集中在 480~505 Ma, 退变质时代为~450 Ma, 北秦岭大陆俯冲-深俯冲作用形成的高压-超高压变质岩石的变质时代集中在 485~514 Ma, 两期退变质时代分别为~450 和~420 Ma. 目前, 柴北缘高压-超高压岩石已积累了丰富的年代学资料(表 3), 其中峰期变质时代为 420~457 Ma, 退变质时代为 397~427 Ma. 宋述光等人[67]进一步解释这些年龄数据, 认为 445~457 Ma 代表柴北缘早期大洋俯冲有关的高压变质时代, 435~420 Ma 为大陆深俯冲形成的超高压岩石的变质时代, 410~400 Ma 为超高压变质岩折返过程中的退变质时代. 显然, 柴北缘从洋壳俯冲-陆壳深俯冲形成的

表 1 南阿尔金高压-超高压变质岩原岩形成或侵位时代、峰期变质和退变质年龄数据

地点/岩石类型	原岩年龄(Ma)	峰期年龄(Ma)	退变年龄(Ma)	测试方法	资料来源
江尕勒萨依地区					
榴辉岩	754±9	493±4		LA-ICP-MS	[47]
	752±7	500±2	455±2		[45]
超高压含石榴石泥质片岩	<647	480±5	450±2		[34]
英格利萨依地区					
石榴石橄榄岩		501±16		SHRIMP	[20]
	730±11	498±3		LA-ICP-MS	[31]
石榴辉石岩		497±11		SHRIMP	[20]
	821±27	488±8		LA-ICP-MS	[48]
含石榴石花岗质片麻岩		493±7		SHRIMP	[20]
	809~885	487±10		SHRIMP	[49]
	857±7	500±4		LA-ICP-MS	[34]
淡水泉地区					
高压泥质麻粒岩	<719	486±5			[32]
含石榴石花岗质片麻岩	867±4	505±5			[33]
木纳布拉克地区					
高压泥质麻粒岩	<563	485±5		LA-ICP-MS	[33]

表 2 北秦岭高压-超高压变质岩原岩形成或侵位时代、峰期变质和退变质年龄数据

地点/岩石类型	原岩年龄(Ma)	峰期年龄(Ma)	退变年龄(Ma)	测试方法	资料来源
官坡地区					
榴辉岩		507±37		SHRIMP	[12]
	791±6	502±11		LA-ICP-MS	[50]
	796±13, 814±45	486±4, 489±6		SIMS, LA-ICP-MS	[35]
		490±4		SIMS	[51]
白云母石英片岩		507±38		SHRIMP	[12]
双槐树地区					
榴辉岩		500±9		SIMS	[51]
清油河地区					
榴辉岩		480±6		LA-ICP-MS	[36]
	699±9	490±6	453±9	LA-ICP-MS	[37]
松树沟地区					
榴闪岩		501±10		SHRIMP	[52]
	~720	514±9, 500±10		LA-ICP-MS	[46]
	787±16	484±4	418±5	LA-ICP-MS	[53]
高压基性麻粒岩		485±3		LA-ICP-MS	[54]
		504±7		SHRIMP	[55]
		499±2	453±2	LA-ICP-MS	刘良等, 未刊数据
超高压长英质片麻岩		486 ~ 511		LA-ICP-MS	[46]
		506±3		SHRIMP	[55]
	＜832±25	497±8	448±4, 421±2	LA-ICP-MS	[37]
寨根地区					
石榴辉石岩		500±6		LA-ICP-MS	[46]
石榴辉石岩	573±40	495±2	450±3, 426±1	LA-ICP-MS	[37]
西峡秦岭梁地区					
榴闪岩	843±7		423±3	LA-ICP-MS	[37]

高压-超高压岩石的变质时代跨度较大(420~457 Ma), 但其变质时代和退变质时代均明显滞后于阿尔金与北秦岭约 30~80 Ma. 另外, 早古生代南阿尔金构造带中花岗质岩浆活动可划分约 500, 466~451, 426~385 Ma 三期[68~70], 北秦岭为 499~495, 464~449, 417~413 Ma 三期[71,72], 第一期与各自区内高压-超高压变质岩的峰期变质时代相一致, 形成于陆-陆碰撞造山作用过程中的陆壳相互叠置加厚阶段; 第二期与高压-超高压岩石的退变质时代大致相当, 形成于俯冲陆壳断离后的伸展构造背景; 第三期形成于碰撞造山作用结束后的伸展减薄阶段. 而柴北缘古生代花岗质岩浆活动分为 475~460, 450~420, 410~395, 370~385 Ma 四期, 其形成构造背景依次分别对应于洋壳俯冲、陆壳俯冲/碰撞、后碰撞(俯冲板片断离)与碰撞后伸展减薄阶段[73~77]. 其中, 就陆壳俯冲板片断离引发的岩浆活动时限而言, 南阿尔金与北秦岭分别为 466~451 和 464~449 Ma, 柴北缘为 410~395 Ma, 柴北缘明显滞后于南阿尔金与北秦岭约 50 Ma. 这些资料进一步表明, 南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质岩带有几乎相同的峰期变质时代、退变质时代以及深俯冲板片断离和伸展减薄引发的岩浆活动的时限, 均明显不同于柴北缘; 并且, 这些特征从西部的阿尔金到东部的北秦岭, 不显示任何增加或减少的渐变趋势. 因此, 南阿尔金、柴北缘和北秦岭三地高压-超高压变质岩带不能构成同一条高压-超高压岩带, 即其形成不能简单用早古生代时期我国南、北两大板块(扬子与华北)同时或剪刀式俯冲碰撞作用加以解释. 结合我国中西部中央山系从新元古代晚期-古生代长期呈现多岛洋、多陆块间杂并存的复杂的古构造格局[78,79]的研究成果, 可以认为南阿尔金、柴北缘和北秦岭三地高压-超高压变质岩带的形成可能是早古生代时期多陆块不同时俯冲-碰撞的产物.

表 3 柴北缘高压-超高压变质岩原岩形成或侵位时代、峰期变质和退变质年龄数据

地点/岩石类型	原岩年龄(Ma)	峰期年龄(Ma)	退变年龄(Ma)	测试方法	资料来源
鱼卡河地区					
榴辉岩	783~793; 748~759	436±3; 431±4	409±4	LA-ICP-MS	[57]
	847±44	~433		SHRIMP	[58]
	847±10			SIMS	[58]
长英质片麻岩		431±3		LA-ICP-MS	[57]
泥质片麻岩		432±19		LA-ICP-MS	[59]
胜利口地区					
石榴石二辉橄榄岩	457±22	423±5	397±6	SHRIMP	[24]
		427±3		LA-ICP-MS	[60]
石榴石橄榄岩	446±13	420±5	~400	SHRIMP	[24]
石榴石辉石岩		399±8		SHRIMP	[24]
		429±3		LA-ICP-MS	[60]
	909±6	440±4	420±3	LA-ICP-MS	[34]
片麻岩		430±5		LA-ICP-MS	[60]
石榴石蓝晶石片麻岩	<1005	454±6	427±10	SHRIMP	[28]
石榴石夕线石片麻岩		443±4	425±4	SHRIMP	[28]
花岗质片麻岩	891±31	449±8		SHRIMP	[28]
锡铁山地区					
榴辉岩		433±3		SHRIMP	[61]
		458±2		LA-ICP-MS	[62]
变基性岩		452±12			
(退变榴辉岩)		430±4			
石榴石蓝晶石片麻岩		461±8		SHRIMP	[63]
石榴石夕线石片麻岩		451±6	409±12		
		423±13			
副片麻岩	890±14	437±16			[28]
		435±7			[28]
野马滩地区					
榴辉岩		449±2			
		442±4; 433±5		SHRIMP	[64]
		457±7		SHRIMP	[26]
含柯石英片麻岩		452±14	419±7	SIMS	[56]
		423±6		SHRIMP	[26]
沙柳河地区					
榴辉岩	516±8	445±7		SHRIMP	[65]
		440±6		SHRIMP	[66]

6 结语

上述研究对深入理解南阿尔金与北秦岭高压-超高压岩石的形成机制和探讨早古生代时期南阿尔金与北秦岭的构造演化过程提供了以下几方面的关键性约束条件:

(1) 新确定的这些岩石的峰期变质时代(~500 Ma)和退变质时代(~450 或~420 Ma)主体来自同一个高压-超高压岩石样品或同一个样品中的同一颗锆石的不同部位[37,45], 结合其变质期次的研究, 充分说明这些高压-超高压岩石经历了一个完整的由陆壳俯冲-深俯冲、之后连续两次抬升的构造演化过程. 另外, 南阿尔金最广泛分布的一期岩浆岩(包括镁铁-超镁铁质岩和花岗岩)的形成时代为 467~441 Ma[58~60], 与

区内超高压岩石的退变质时代(~450 Ma)基本一致; 同时还发育少量形成时代为 420~400 Ma 一期的花岗岩[80,81]. 与南阿尔金类似, 北秦岭最广泛产出的一期岩浆岩的形成时代约为 450 Ma 和少量发育的~420 Ma 一期花岗岩[61,62]以及~460 Ma 的四方台镁铁质-超镁铁质岩体和~420 Ma 的拉鸡庙镁铁质岩体[82,83], 其形成时代分别与北秦岭高压-超高压岩石的两期退变质时代(~450 和~420 Ma)基本一致. 显然, 南阿尔金与北秦岭~450 和~420 Ma 两期岩浆岩的形成可能都是各自区内俯冲-深俯冲陆壳岩石折返的岩浆作用的响应, 分别对应于深俯冲陆壳板片断离和碰撞造山结束后伸展减薄的构造背景; 同时, 暗示这两地拖曳陆壳发生俯冲-深俯冲作用的洋壳主体关闭时限应为~500 Ma.

(2) 南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质岩的原岩形成或侵位时代均为新元古代, 因此, 限定俯冲-深俯冲的陆壳物质应来自形成时代为新元古代的大陆地壳或地质体.

(3) 依据上述新的研究资料, 以及大陆地壳深俯冲是由洋壳拖曳所致的基本思想[9,26,84,85], 并结合南阿尔金阿帕-茫崖蛇绿岩带形成时代大于 500 Ma[86,87]以及北秦岭丹凤古洋盆自新元古代末 600 Ma 形成至 520 Ma 开始俯冲消减[88]的研究成果综合分析, 可以初步认为南阿尔金与北秦岭高压-超高压变质岩带的形成, 分别是南阿尔金洋向北俯冲拖曳其南侧的亲扬子地块属性的部分新元古代陆壳物质、以及商丹洋向北俯冲拖曳南秦岭部分新元古代陆壳物质在~500 Ma 发生陆壳俯冲-深俯冲作用的产物[34,37], 之后在~450 与~420 Ma 经历了两期抬升. 诚然, 该模型尚需南阿尔金洋盆和北秦岭商丹洋盆在约 500 Ma 时主体已经关闭的确切地质证据的进一步支持, 有待深入研究确定.

参考文献

1 Zheng Y F, Zhang L F, McClelland W C, et al. Processes in continental collision zones: Preface. Lithos, 2012, 136-139: 1–9
2 Chopin C. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. Earth Planet Sci Lett, 2003, 212: 1–14
3 Carswell D A. Eclogites and the eclogite facies: Definitions and classifications. In: Carswell D A, ed. Eclogite Facies Rocks. Glasgow and London: Blackie, 1990. 1–13
4 Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. Int Geol Rev, 1996, 38: 485–594
5 Ernst W G. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices-implications for arcs and continental growth. Phys Earth Planet Int, 2001, 127: 253–275
6 Ernst W G. Preservation/exhumation of ultrahigh-pressure subduction complexes. Lithos, 2006, 92: 321–335
7 Liou J G, Ernst W G, Zhang R Y, et al. Ultrahigh-pressure minerals and metamorphic terranes—The view from China. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 199–231
8 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. Earth Sci Rev, 2003, 62: 105–161
9 郑永飞, 叶凯, 张立飞. 发展板块构造: 从洋壳俯冲到大陆碰撞. 科学通报, 2009, 54: 1799–1803
10 Yang J S, Xu Z Q, Song S G, et al. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Paleozoic ultrahigh pressure(UHP)metamorphic belt, NW China. Sci Terre Planet, 2001, 333: 719–724
11 Yang J S, Xu Z Q, Dobrzhinetskaya L F, et al. Discovery of metamorphic diamonds in central China: An indication of a > 4000 km long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions. Terra Nova, 2003, 15: 370–379
12 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 等. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 2002, 4: 485–495
13 Liu L, Chen D L, Sun Y, et al. Discovery of relic majoritic garnet in felsic metamorphic rocks of Qinling complex, north Qinling orogenic belt, China. In: Eide E A, ed. the Alice Wain Memorial Western Norway Eclogite Field Symposium. Selje, Western Noway, 2003. 82
14 刘良, 孙勇, 校培喜, 等. 阿尔金发现超高压(>3.8 GPa)石榴二辉橄榄岩. 科学通报, 2002, 47: 657–662
15 刘良, 孙勇, 罗金海, 等. 阿尔金英格利萨依花岗片麻岩超高压变质. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 1184—1192
16 刘良, 陈丹玲, 张安达, 等. 阿尔金超高压(>7 GPa)片麻状(含)钾长石榴辉石岩——石榴子石出熔单斜辉石的证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 105–114
17 Liu L, Zhang J F, Green H W, et al. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments, implying subduction >350 km. Earth Planet Sci Lett, 2007, 263: 180–191

18 Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogite from the western segment of the Altyn Tagh, Northwestern China. Lithos, 2001, 56: 187–206
19 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. 科学通报, 2002, 47: 23l–234
20 Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the South Altyn, NW China: P-T history and U-Pb geochronology. J Metamor Geol, 2005, 23: 491–510
21 Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, Northern Tibet, NW China. J Metamor Geol, 2003, 21: 631–344
22 Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. Lithos, 2003, 70: 195–211
23 Song S G, Zhang L F, Niu Y L. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. Am Mineral, 2004, 89: 1330–1336
24 Song S G, Zhang L F, Su L, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons in garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: A record of complex histories associated with continental collision. Earth Planet Sci Lett, 2005, 234: 99–118
25 Song S G, Zhang L F, Chen J, et al. Sodic amphibole exsolutions in garnet from garnet-peridotite, North Qaidam UHPM belt, NW China: Implications for ultra deep-origin and hydroxyl defects in mantle garnets. Am Mineral, 2005, 90: 814–820
26 Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data. J Petrol, 2006, 47: 435–455
27 Zhang G B, Zhang L F, Song S G, et al. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a coesite-bearing meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 310–322
28 Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. Polyphase Tectonothermal History Recorded in Granulitized Gneisses from the North Qaidam HP/UHP Metamorphic Terrane, Western China: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology. Geol Soc Am Bull, 2008, 120: 732–749
29 Ernst W G, Liou J G. High- and ultrahigh-pressure metamorphism: Past results and future prospects. Am Mineral, 2008, 93: 1771–1786
30 Liou J G, Ernst W G, Zhang R Y. Ultrahigh-pressure minerals and metamorphic terranes—The view from China. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 199–231
31 Wang C, Liu L, Chen D L, et al. Petrology, geochemistry, geochronology and metamorphic evolution of garnet peridotites from South Altyn UHP terrane, NW China: Records related to crustal slab subduction and exhumation history. In: Dobrzhinetskaya L, Cuthbert S, Faryad W, et al., eds. UHPM: 25 Years after Discovery of Coesite and Diamond. New York: Elsevier, 2011. 541–577
32 曹玉亭, 刘良, 王超, 等. 阿尔金淡水泉早古生代泥质高压麻粒岩及其 P-T 演化轨迹. 岩石学报, 2009, 25: 2260–2270
33 曹玉亭, 刘良, 王超, 等. 南阿尔金木纳布拉克地区高压泥质麻粒岩的确定及其地质意义. 岩石学报, 2013, 29: 1727–1739
34 曹玉亭. 南阿尔金造山带和柴北缘胜利口地区高压-超高压变质作用演化及其熔流体活动. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 2013
35 Wang H, Wu Y B, Gao S, et al. Eclogite origin and timings in the North Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China Blocks. J Metamor Geol, 2011, 29: 1019–1031
36 Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. Geochronology of the transition of eclogite to amphibolite facies metamorphism in the North Qinling orogen of central China. Lithos, 2011, 125: 969–983
37 刘良, 廖小莹, 张成立, 等. 北秦岭高压-超高压岩石的多期变质时代及其地质意义. 岩石学报, 2013, 29: 1634–1656
38 刘良, 杨家喜, 章军峰, 等. 超高压岩石中矿物显微出溶结构研究进展、面临问题与挑战. 科学通报, 2009, 54: 1387–1400
39 Yang J S, Dobrzhinetskaya L, Bai W J, et al. Diamond-and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. Geology, 2007, 35: 875–878
40 Irifune T, Ringwood A E, Hibberson W O. Subduction of continental crust andterrigenous and pelagic sediments: An experimental study. Earth Planet Sci Lett, 1994, 126: 351–368
41 Ono S. Stability limits of hydrous minerals in sediment and mid-ocean ridge basaltcompositions: Implications for water transport in subduction zones. J Geophys Res, 1998, 103: 18253–18267
42 Dobrzhinetskaya L F, Green H W. Experimental studies of mineralogical assemblages of metasedimentary rocks at Earth's mantle transition zone conditions. J Metamor Geol, 2007, 25: 83–96
43 Wu Y, Fei Y W, Jin Z M, et al. The fate of subducted Upper Continental Crust: An experimental study. Earth Planet Sci Lett, 2009, 282: 275–284
44 Liu L, Zhang J F, Cao Y T, et al. Evidenve for the ultra-deep subduction (≥10 GPa) of the continental rock from the North Qinling terrane: Constrained from the high temperature and high pressure experiment. Acta Geol Sin-Engl, 2013, 87(Supp): 494–495
45 Liu L, Wang C, Cao Y T, et al. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China. Lithos, 2012, 136-139: 10–26
46 Liu L, Yang J X, Chen D L, et al. Progress and controversy in the study of HP-UHP metamorphic terranes in the west and middle Central China Orogen. J Earth Sci, 2010, 5: 581–597

47 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 阿尔金江尕勒萨依榴辉岩和同岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义. 地学前缘, 2007, 14: 98–107
48 Liu L, Wang C, Chen D L, et al. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the South Altyn Tagh, northwestern China. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 232–244
49 张安达, 刘良, 孙勇, 等. 阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 2004, 49: 2335–2341
50 陈丹玲, 刘良. 北秦岭榴辉岩及相关岩石年代学的进一步确定及其对板片俯冲属性的约束. 地学前缘, 2011, 18: 158–169
51 Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. Timing of eclogite facies metamorphism in the North Qinling by U-Pb and Lu-Hf geochronology. Lithos, 2012, 136-139: 46–59
52 苏犁, 宋述光, 宋彪, 等. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约. 科学通报, 2004, 49: 1209–1211
53 李晔, 周汉文, 钟增球, 等. 北秦岭早古生代两期变质作用: 来自松树沟基性岩岩石学及锆石 U-Pb 年代学的记录. 地球科学, 2012, 37: 111–124
54 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 2004, 49: 1901–1908
55 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用. 岩石学报, 2011, 27: 1179–1190
56 Yang J S, Liu F L, Wu C L, et al. Two ultrahigh-pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: Evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons. Int Geol Rev, 2005, 47: 327–343
57 Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukahe HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 259–272
58 Song S G, Su L, Li X H, et al. Tracing the 850-Ma continental flood basalts from a piece of subducted continental crust in the North Qaidam UHPM belt, NW China. Precambrian Res, 2010, 183: 805–816
59 陈丹玲, 孙勇, 刘良. 柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其地质意义. 地学前缘, 2007, 14: 107–116
60 Xiong Q, Zheng J P, Griffin W L, et al. Zircons in the Shenglikou ultrahigh-pressure garnet peridotite massif and its country rocks from the North Qaidam terrane(western China): Meso-Neoproterozoic crust-mantle coupling and early Paleozoic convergent plate-margin processes. Precambrian Res, 2011, 187: 33–57
61 宋述光, 张聪, 李献华, 等. 柴北缘超高压带中锡铁山榴辉岩的变质时代. 岩石学报, 2011, 27: 1191–1197
62 Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. Felsic veins within UHP eclogite at Xitieshan in the North Qaidam, NW China: Partial melting during exhumation. Lithos, 2012, 136-139: 187–200
63 Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. U-Pb geochronology of paragneisses and metabasite in the Xitieshan area, north Qaidam Mountains, western China: Constraints on the exhumation of HP/UHP metamorphic rocks. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 245–258
64 Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, et al. Age and duration of eclogite-facies metamorphism, North Qaidam HP/UHP terrane, western China. Am J Sci, 2006, 306: 683–711
65 Zhang G B, Song S G, Zhang L F, et al. The subducted oceanic crust with in continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. Lithos, 2008, 104: 99–118
66 Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, et al. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing elcogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China. Eur J Mineral, 2009, 21: 1287–1300
67 宋述光, 张贵宾, 张聪, 等. 大洋俯冲和大陆碰撞的动力学过程: 高压-超高压变质带的岩石学制约. 科学通报, 2013, 58: 2240–2245
68 曹玉亭, 刘良, 王超, 等. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成.岩石学报, 2010, 26: 3257–3271
69 马中平, 李向民, 徐学义, 等. 南阿尔金山清水泉镁铁超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义. 中国地质, 2011, 38: 1071–1078
70 杨文强, 刘良, 丁海波, 等. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学, 锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征及其构造地质意义. 岩石学报, 2012, 28: 4139–4150
71 王涛, 王晓霞, 田伟, 等. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 949–971
72 张成立, 刘良, 王涛, 等. 北秦岭早古生代深俯冲陆壳折返的岩浆作用响应. 科学通报, 2013, 58: 2323–2329
73 吴才来, 杨经绥, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗质岩浆作用. 岩石学报, 2004, 20: 658–674
74 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 2007, 23: 1861–1875
75 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 930–949

76 吴锁平. 柴北缘古生代花岗岩类成因及其造山响应. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 2008
77 Yu S Y, Zhang J X, Del Real P G. Geochemistry and zircon U-Pb ages of adakitic rocks from the Dulan area of North Qaidam UHP terrane, north Tibet: Constraints on the timing and nature of regional tectonothermal events associated with collisional orogeny. Gondwana Res, 2012, 21: 167–179
78 殷鸿福, 张克信. 中央造山带的演化及其特点. 地球科学, 1998, 23: 438–442
79 张国伟, 张本仁, 袁学成, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001
80 王超, 刘良, 张安达, 等. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用:玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据. 岩石学报, 2008, 24: 2809–2819
81 吴锁平, 吴才来, 陈其龙. 阿尔金断裂南侧吐拉铝质 A 型花岗岩的特征及构造环境. 地质通报, 2007, 26: 1385–1392
82 刘军锋, 孙勇, 冯涛, 等. 北秦岭四方台基性-超基性杂岩的地球化学特征及其成因. 地球化学, 2008, 37: 174–186
83 刘军锋, 孙勇, 孙卫东. 秦岭拉鸡庙镁铁质岩体锆石 LA-ICP-MS 年代学研究. 岩石学报, 2009, 25: 320–330
84 Ye K, Cong B L, Ye D N. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. Nature, 2000, 407: 734–736
85 张立飞, 吕增, 张贵宾, 等. 大洋型超高压变质带的地质特征及其研究意义: 以西南天山、柴北缘超高压变质带为例. 科学通报, 2008, 53: 2166–2175
86 李向民, 马中平, 孙吉明, 等. 阿尔金断裂南缘约马克其镁铁-超镁铁岩的性质和年代学研究. 岩石学报, 2009, 25: 862–872
87 孙吉明, 马中平, 唐卓, 等. 阿尔金南鱼目泉岩浆混合花岗岩 LA-ICP-MS 测年与构造意义. 地质学报, 2012, 86: 247–257
88 Shi Y, Yu J, Santosh M. Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: New evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. Precambrian Res, 2013, 231: 19–60