中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 8 期: 1126 ~ 1137
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

专题: 大陆俯冲带

评 述

南阿尔金早古生代俯冲碰撞过程中的花岗质岩浆作用

刘良[①*], 康磊[①†], 曹玉亭[②], 杨文强[①]

① 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069;
② 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590
* 联系人, E-mail: liuliang@nwu.edu.cn
† 联系人, E-mail: kanglei@nwu.edu.cn

收稿日期: 2015-03-25; 接受日期: 2015-06-30; 网络版发表日期: 2015-07-24
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2015CB856103)、国家自然科学基金项目(批准号: 41430209, 4140020262, 41421002)、国土资源部地质调查局西昆仑-阿尔金关键地区区域地质调查项目、教育部创新团队发展计划和西北大学大陆动力学国家重点实验室自主研究重点课题资助

摘要 南阿尔金俯冲碰撞杂岩带早古生代存在 517, 501~496, 462~451 和 426~385 Ma 四个期次的花岗质岩浆岩. 第一期岩浆岩侵位于区内蛇绿岩型镁铁质岩石之中, 后三期分别对应于该构造带高压-超高压岩石~500 Ma 的峰期变质及其~450 和~420 Ma 的两期退变质时间. 结合区域地质背景、镁铁-超镁铁质岩和高压-超高压变质作用研究成果综合分析, 这四期岩浆岩分别是南阿尔金早古生代板块俯冲碰撞过程中, 先期俯冲洋壳, 之后陆壳深俯冲导致地壳加厚引发下地壳以及深俯冲板片断离导致中上地壳和造山后伸展减薄阶段部分熔融作用的产物. 其中, 洋壳型埃达克岩的形成时代(517 Ma)为南阿尔金洋壳俯冲作用时限提供了直接约束, 陆壳深俯冲引发的高压-超高压峰期变质时代(~500 Ma)作用滞后这一事件约 10 Myr, 表明南阿尔金早古生代时期由洋壳俯冲转换为陆壳俯冲可能是一个连续的构造演化过程. 这四期花岗质岩石与区内蛇绿岩型镁铁-超镁铁质岩石以及高压-超高压变质岩石的形成, 共同记录了南阿尔金早古生代时期从大洋俯冲、之后的大陆深俯冲碰撞再到后来深俯冲陆壳折返抬升的完整构造演化过程.

关键词
南阿尔金
花岗岩质岩浆作用
洋壳俯冲
陆壳深俯冲
构造演化过程

造山带的形成一般都经历了长期而复杂的演化历史, 包括早期大洋俯冲、闭合, 大陆俯冲碰撞、折返, 造山带隆升及垮塌等一系列构造过程(Song等, 2014a; Zheng等, 2013). 大洋地壳俯冲过程中会发生变质脱水产生流体, 这些流体会交代上覆地幔楔, 引起显著的壳幔相互作用乃至弧火山作用(Hofmann, 1997; Zheng, 2012; 魏春景和张颖慧, 2008), 当洋壳俯冲到较大深度时还可发生部分熔融形成埃达克岩(Castillo, 2012; Defant和Drummond, 1990). 大陆地壳由于具有相对古老、干和冷的特征, 在俯冲过程中释

中文引用格式: 刘良, 康磊, 曹玉亭, 杨文强. 2015. 南阿尔金早古生代俯冲碰撞过程中的花岗质岩浆作用. 中国科学: 地球科学, 45: 1126–1137
英文引用格式: Liu L, Kang L, Cao Y T, Yang W Q. 2015. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China. Science China: Earth Sciences, 58: 1513–1522, doi: 10.1007/s11430-015-5151-1

放流体极为有限, 因而通常不会引发大规模的同俯冲岩浆作用(Rumble等, 2003; Zheng等, 2003). 然而, 近年来的研究发现, 俯冲陆壳岩石在深部(80~120 km), 即在高压-超高压峰期变质或早期折返阶段, 会发生显著脱水乃至部分熔融产生岩浆作用(Zheng, 2009; Zheng等, 2011); 同时, 陆壳深俯冲作用可导致地壳加厚, 也可能引发少量同俯冲岩浆作用, 如Zhang等(2014)最近提出北秦岭富水杂岩的形成是同俯冲岩浆作用的产物. 此外, 在深俯冲陆壳折返和碰撞后加厚造山带伸展垮塌过程中, 可以形成大量的同折返和碰撞后岩浆岩(Song等, 2014a, 2014b; Wang等, 2014a; 赵子福和郑永飞, 2009). 因此, 在俯冲/碰撞造山带的不同演化阶段都可能有岩浆作用的响应, 形成各类岩浆岩体(Pitcher, 1983; Zhao等, 2012, 2013; Zheng, 2012). 研究这些岩浆岩的形成时代、岩石类型、地球化学特征、源区性质和成因机制, 对揭示造山带古洋壳俯冲、陆壳俯冲碰撞造山以及岩石圈循环再造的构造演化过程具有重要意义.

南阿尔金造山带是中国西部一条重要的早古生代俯冲碰撞杂岩带. 近十多年来, 区内高压-超高压变质作用及其演化研究备受关注, 目前在陆壳俯冲深度、俯冲/折返时限及其变质演化、俯冲陆壳属性及俯冲极性等研究方面已取得重要进展(Liu等, 1997, 2002, 2007a, 2007b, 2009, 2012; 刘良等, 2003, 2005; Wang等, 2011; Zhang等, 2001, 2002, 2004, 2005; 曹玉亭等, 2009; 刘良等, 1999, 2007; 张建新等, 2001). 已有研究表明, 这些高压-超高压岩石的形成是陆壳深俯冲作用的产物(Liu等, 1997; 刘良等, 2003, 2005; Zhang等, 2001, 2002; 张建新等, 2001), 峰期变质作用之后主体又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深俯冲、之后连续两次抬升的构造演化过程(Liu等, 2012). 另外, 南阿尔金阿帕-茫崖蛇绿构造混杂岩研究也取得较大进展, 主要表现在蛇绿岩型镁铁-超美铁质洋壳残片的精确定年(郭金城等, 2014; 李向民等, 2009; 刘良等, 1998; 刘良, 1999; 王焰等, 1999)和非蛇绿岩型碰撞后镁铁-超镁铁质岩的发现(董洪凯等, 2014; 马中平等, 2009, 2011), 前者为南阿尔金洋盆存在时限提供了较好约束, 后者表明区内构造体制发生了转变. 这些认识的提出, 为探讨南阿尔金早古生代板片俯冲碰撞过程与时限提供了重要约束条件.

此外, 南阿尔金地区还广泛出露大量早古生代花岗质岩体, 它们作为南阿尔金造山带构造演化过程的岩浆响应, 记录着壳幔相互作用、岩石圈演化等关键信息, 是研究揭示南阿尔金陆壳深俯冲作用及折返演化过程的重要窗口. 以往由于海拔高、自然条件恶劣、交通不便, 区内花岗岩的研究程度总体较低, 很多地区花岗岩岩体的精细研究还是空白. 随着近几年区内岩浆岩研究工作的陆续展开, 逐渐积累了一批新资料和新成果(Kang等, 2014; Wang等, 2014b; 曹玉亭等, 2010; 康磊等, 2013; 孙吉明等, 2012; 王超等, 2008; 吴才来等, 2014; 吴锁平等, 2007; 杨文强等, 2012a). 然而, 以往这些研究主要聚焦于某单个岩体, 关于南阿尔金早古生代花岗质岩浆活动究竟有几期、不同期次花岗质岩浆作用的构造背景及其与蛇绿岩、高压-超高压变质岩石之间的构造成因联系尚缺乏系统全面的研究. 鉴于此, 本文在系统总结南阿尔构造带近年来早古生代花岗质岩岩石学、同位素年代学、地球化学等最新资料的基础上, 重点探讨了这些花岗质岩浆岩的期次、源区性质及其成因机制, 并结合区内高压-超高压变质岩、镁铁-超镁铁质岩的研究成果, 探讨了南阿尔金造山带早古生代的构造演化过程.

1 南阿尔金区域地质概况

依据区域地质特征、地层学、岩石学、地球化学与同位素年代学的研究结果, 阿尔金造山带由北向南可依次划分为四个构造单元(Liu等, 2002; Xu等, 1999; Zhang等, 2001; 胡云绪等, 2010; 刘良等, 1999, 2002, 2003)(图1(c)): (1) 阿北变质地体, 主要由太古代麻粒岩相变质的中酸性-基性火山岩系、具孔兹岩系特征的变质岩系组成, 其上不整合覆以中-新元古代蓟县系(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)-青白口系地层(胡云绪等, 2010), 南华系地层(Lu等, 2008); (2) 红柳沟-拉配泉构造混杂岩带, 主要由早古生带蛇绿岩片、洋岛玄武岩和含晚寒武世-中奥陶世牙形石化石的深水沉积硅质岩、浅水-半深水沉积岩块、以及高压变质岩块组成(刘良, 1999); (3) 米兰河-金雁山地块, 地形上为阿尔金中央隆起带, 基底为中元古界变砂岩、大理岩, 上覆厚层叠层石灰岩(蓟县系);

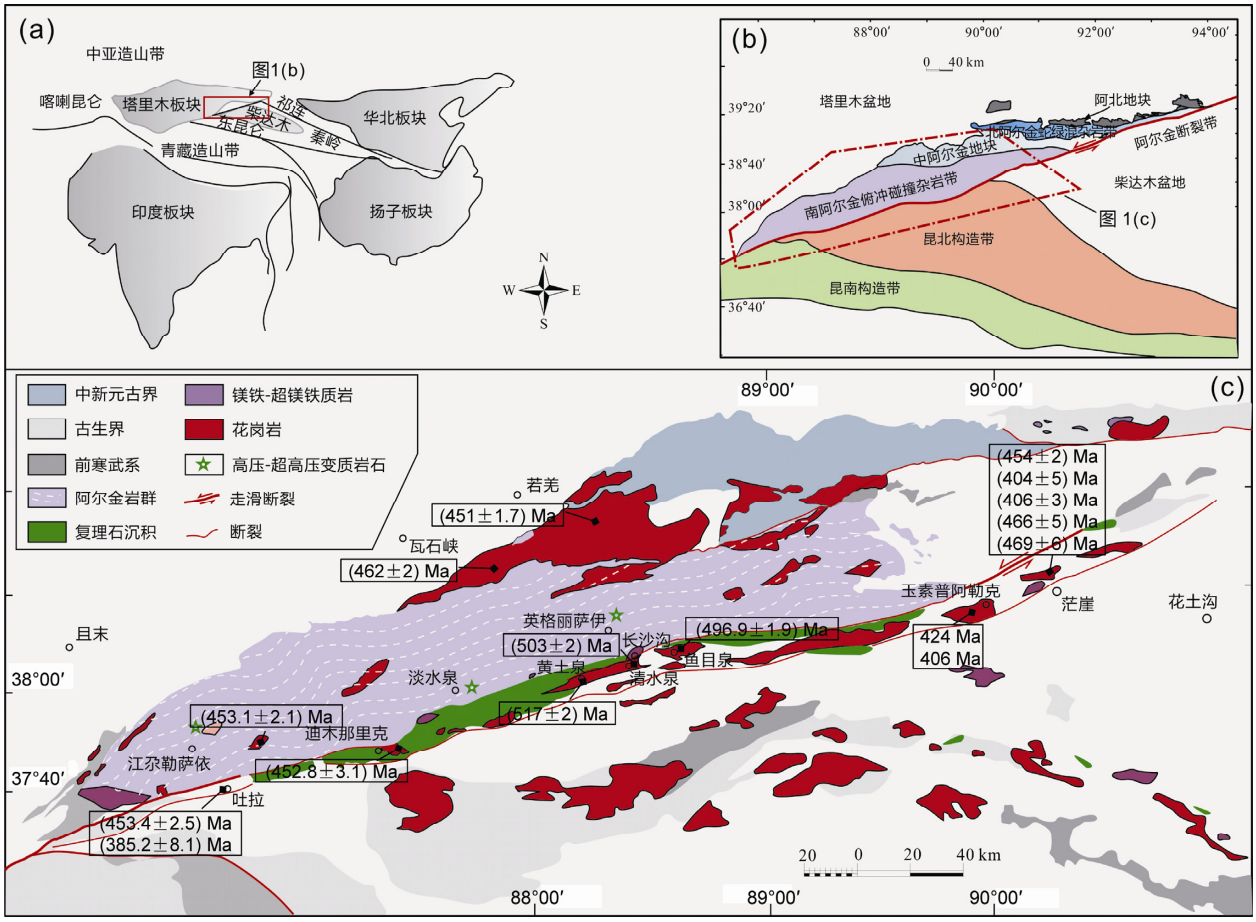


图 1　阿尔金造山带构造地质图

修编自 Liu 等(2002)和 Wang 等(2014b)

上元古界青白口系(一些资料称索尔库里群)不整合于隆起带两侧; (4) 南阿尔金俯冲-碰撞杂岩带, 可进一步划分为高压-超高压变质带和阿帕-茫崖蛇绿混杂岩带两部分.

南阿尔金高压-超高压变质岩石主要包括榴辉岩、含蓝晶石石榴子石泥质片麻岩、石榴二辉橄榄岩、含钾长石的石榴子石辉石岩和石榴子石花岗质片麻岩等高压–超高压变质岩石, 主要分布在西段江尕勒萨依、清水泉和中段英格萨利萨依三个地区, 并向东断续可追索到茫崖石棉矿一带, 东西向展布200 km以上(刘良等, 2003). 精细的岩石学和年代学研究表明, 其中超高压榴辉岩峰期变质之后又经历了高压麻粒岩相与角闪岩相两期退变质作用, 其原岩形成时代、峰期变质与高压麻粒岩相退变质时代分别为约750, 500与450 Ma(Liu等, 2009, 2010, 2012; 刘良等, 2013).

南阿尔金阿帕-茫崖蛇绿混杂岩主要分布于阿尔金南缘断裂带附近, 东起青海新疆交界的茫崖西至阿帕共约700 km, 主要由早古生带蛇绿岩残片、镁铁-超镁铁质岩与震旦-早寒武纪复理石沉积物组成. 以往多数学者认为它们均具有蛇绿岩性质, 将其称为阿帕-茫崖蛇绿岩带(车自成等, 2002; 何国琦等, 1994; 赖绍聪等, 1996; 刘良等, 1998; 刘良, 1999; 潘桂堂等, 1997; 王焰等, 1999). 近年来, 该蛇绿混杂岩带中蛇绿岩形成时代的上限年龄得到进一步限定, 表明南阿尔金洋盆存在时限主体应>500 Ma(郭金城等, 2014; 李向民等, 2009; 杨文强等, 2012b); 此外还陆续从中厘定出一套形成时代为~450 Ma非蛇绿岩端元的碰撞后镁铁-超镁铁质岩, 如长沙沟-清水泉地区识别出了一套形成于碰撞后伸展背景下的非

蛇绿岩组成单元的镁铁-超镁铁质层状侵入岩, 其形成时代为467~445 Ma, 代表了南阿尔金地区在中晚奥陶纪已处于伸展背景(董洪凯等, 2014; 马中平等, 2009, 2011). 因此, 分布于阿尔金南缘断裂带附近的镁铁-超镁铁质岩体可进一步分为两种类型: 一类形成时代>500 Ma, 具有蛇绿岩性质; 另一类形成时代约为465~445 Ma, 不具有蛇绿岩性质(杨文强等(2012b)及其参考文献).

紧邻南阿尔金构造带南侧是东昆北构造带(图1(b)), 以出露大面积前寒武结晶基底和古生代花岗岩、少量泥盆系和石炭系地层为特征. 结晶基底岩系主要包括古元古界白沙河岩组和中元古界小庙岩组(李瑞保, 2012). 其中, 小庙岩组主体为一套石英岩和石榴云母石英片岩组合, 其中的黑云斜长片麻岩锆石U-Pb定年获得变质年龄为1554 Ma, 限定了地层形成时代的上限, 原岩为一套稳定的碎屑岩沉积组合(陈有炘等, 2011). 唐卓等(2011)还在其中的斜长角闪岩中获得了1786~1877 Ma的锆石U-Pb年龄. 此外, 有限的年代学研究还表明区内早古生代时期主要发育~450 Ma(高晓峰等, 2010)和~410 Ma两期花岗岩(Wang等, 2014b; 龙晓平等, 2006; 陆露等, 2013).

2 南阿尔金早古生代花岗岩的时空分布

南阿尔金地区大量发育早古生代花岗质岩石, 这些花岗质岩石形成的年代学格架及其构造背景对于反演早古生代南阿尔金地区构造演化过程具有十分重要的意义. 通过统计区内已发表的花岗质岩石的年代学数据(表1), 并结合野外地质和岩石学特征可划分出~517, 501~496, 462~451和426~385 Ma四期花岗岩浆作用(图2).

(1) 第一期(517 Ma)花岗质岩石以岩脉或小岩株状侵入于南阿尔金蛇绿构造混杂岩之中, 分布范围较为有限(图1), 以出露于南阿尔金长沙沟黄土泉岩体为代表(康磊, 2015), 与围岩镁铁-超镁铁质岩共同侵入于区内的复理石沉积建造. 岩石类型以花岗闪长岩为主, 岩石呈片麻状构造. 主要矿物组成为斜长石(30%~50%, 主要为更-中长石), 角闪石(20%~30%), 石英(~20%)和黑云母(~10%), 以及少量的钾长石(<5%). 其中角闪石和黑云母等暗色矿物具有定向分布的特征, 显微镜下可见到石英具有波状消光. 该岩体的形成时代为(517.3±1.7) Ma(康磊, 2015), 是目前南阿尔金古生代最早一期的花岗岩浆侵入事件.

(2) 第二期(501~496 Ma)花岗质岩石主要出露于南阿尔金蛇绿混杂岩带之中, 代表性岩体是南阿尔金长沙沟岩体和鱼目泉岩体, 岩体周边多被古近纪-新近纪陆相粗碎屑沉积物覆盖, 分布范围较第一期稍广(图1). 长沙沟岩体主要由花岗闪长岩构成, 主要矿物组成为: 斜长石(40%~60%, 主要为更-中长石), 石英(~30%), 黑云母(~10%), 角闪石(~10%), 钾长石(<5%). 该岩石亦呈片麻状构造, 其中角闪石和黑云母呈定向分布. 该岩体的形成时代为(503.1±1.7) Ma(康磊, 2015). 鱼目泉岩体主要由黑云母花岗闪长岩和花岗闪长岩构成, 其中含有大量暗色闪长质-辉长闪长质岩浆包体, 具有明显的壳-幔岩浆混合花岗岩的特征, 其中寄主岩石(黑云母花岗闪长岩)的形成时代为(496.9±1.9) Ma(孙吉明等, 2012), 与长沙沟花岗闪长岩的年龄在误差范围内一致, 共同代表了南阿尔金早古生代中寒武纪晚期的一期地壳熔融和花岗岩浆侵入事件.

(3) 第三期(462~451 Ma)花岗质岩石呈岩基或岩株侵入于南阿尔金变质地体之中(图1), 岩体变形较弱, 部分岩体发育一定的片麻理, 主要由钾长花岗岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩和片麻状花岗岩等构成. 这一期花岗岩在南阿尔金地区分布非常广泛, 包括吐拉、江尕勒萨依、迪木那里克、瓦石峡、若羌河和茫崖岩体. 其中江尕勒萨依黑云母花岗岩主要组成矿物为钾长石(30%~40%), 斜长石(20%~30%), 石英(20%~25%), 黑云母(10%~15%); 若羌河片麻状花岗岩的主要组成矿物为钾长石(35%~40%), 斜长石(20%~25%), 黑云母(15%~20%)和白云母(10%~15%), 石英(10%~15%) (康磊, 2015). 锆石U-Pb定年显示上述地区花岗质岩石形成年龄分别为(453.4±2.5), (453.1±2.1), (452.8±3.1), (462±2), (454.0±1.8)和(451±1.7) Ma(曹玉亭等, 2010; 康磊等, 2013; 康磊, 2015; 杨文强等, 2012a). 另外, 南阿尔金西段木拉布拉克一带发育的辉长岩的形成时代分别为~450 Ma(康磊, 2015), 长沙沟中段辉长岩的形成时代为464~445 Ma(董洪凯等, 2014; 马中平等, 2009, 2011), 它们与450 Ma左右的花岗质岩浆岩一道, 共同反映了南阿尔金早古生代时期最为强烈的一期区域性壳源花岗质岩浆和幔源基性岩浆侵入的构造岩浆热事件.

表 1　南阿尔金早古生代花岗岩类形成时代、构造背景统计

构造位置	地区	年龄(Ma)	岩石类型	岩石系列	源岩性质	构造背景	参考文献
南阿尔金构造带西段	迪木那里克	452.8±3.1	钾长花岗岩	弱过铝质高钾钙碱性	上地壳杂砂岩	俯冲陆壳断离后的伸展背景	杨文强等(2012a)
	吐拉	385.2±8.1	碱性花岗岩	A 型花岗岩	上地壳	造山后的拉张环境	吴锁平等(2007)
	黄土泉	517±2	花岗闪长岩	低钾拉斑-中钾钙碱性	玄武质洋壳	洋壳俯冲环境	康磊(2015)
	吐拉	453.4±2.5	钾长花岗岩	高钾钙碱性	上地壳变泥砂质岩	后碰撞初始伸展	康磊(2015)
	江尕勒萨依	453.1±2.1	二长花岗岩	高钾钙碱性	上地壳变泥砂质岩	后碰撞初始伸展	康磊(2015)
南阿尔金构造带西段	鱼目泉	496.9±1.9	黑云母花岗闪长岩	准铝质-过铝质中-高钾钙碱性	下地壳变质碎屑岩	陆陆碰撞的地壳加厚环境	孙吉明等(2012)
	长沙沟	503±2	花岗闪长岩	中钾钙碱性系列	基性下地壳	陆壳深俯冲过程	康磊(2015)
	瓦石峡	462±2	二长花岗岩	过铝质高钾钙碱性	中下地壳变质碎屑岩	碰撞造山后的抬升初期	曹玉亭等(2010)
	若羌河	451±1.7	片麻状花岗岩	高钾钙碱性	上地壳杂砂岩变质碎屑岩	俯冲碰撞造山后抬升阶段/伸展背景	康磊等(2013)
南阿尔金构造带东段	茫崖	454.0±1.8	黑云母花岗岩	高钾钙碱性	上地壳变泥砂质岩	后碰撞初始伸展	康磊(2015)
		404±5	钾长花岗岩	准铝质钙碱性	新生地壳	活动大陆边缘	吴才来等(2014)
		406±3	二长花岗岩	准铝质钙碱性	新生地壳	活动大陆边缘	
		466±5	花岗闪长岩	准铝质钙碱性	新生地壳	大洋岛弧	
		469±6	石英闪长岩	准铝质钙碱性	新生地壳	大洋岛弧	
	祁曼塔格-南阿尔金	450	花岗闪长岩	高钾钙碱性	下地壳榴闪岩	陆壳部分熔融	Wang 等(2014b)
		430~420	二长花岗岩	高钾钙碱性	变火成岩	中下地壳火山岩夹层部分熔融	
		400~380	碱性花岗岩	强过铝质高钾钙碱性	变泥质岩石	富泥质源区	
	玉素普阿勒克	424	似斑状钾长花岗岩	准铝质高钾钙碱性	下地壳	造山后伸展阶段	王超等(2008)
		406	花岗细晶岩	过铝质中钾钙碱性	下地壳	造山后伸展阶段	

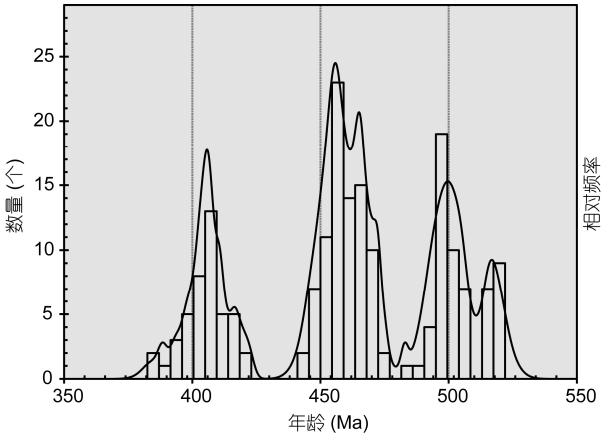


图 2　南阿尔金早古生代岩浆岩锆石 U-Pb 年龄分布图

数据来自表 1 中参考文献

(4) 第四期(426~385 Ma)花岗岩主要呈岩株或岩脉出露于阿尔金南缘主断裂带内(图1). 岩石无任何变形, 主要由碱长花岗岩、角闪钾长花岗岩、二长花岗岩和正长花岗岩等构成, 出露范围较广. 茫崖正长花岗岩主要矿物组成为钾长石(50%~65%)、石英(20%~30%), 其次为斜长石(10%~15%), 少量的黑云母(5%) (吴才来等, 2014). 锆石U-Pb定年结果显示吐拉碱长花岗岩的形成时代为(385.2±8.1) Ma, 玉苏普阿勒克塔格花岗细晶岩和钾长花岗岩的形成时代为406和424 Ma, 茫崖地区二长花岗岩和正长花岗岩的形成年龄为404和411 Ma(王超等, 2008; 吴才来等, 2014; 吴锁平等, 2007), 代表了南阿尔金古生代最晚的一期花岗质岩浆活动.

3　四期花岗质岩石的地球化学特征及成因

第一期花岗岩质岩石形成时代(~517 Ma)早于区内高压-超高压峰期变质时代(504~487 Ma). 该期花岗岩属于中-酸性过渡岩石(SiO_2=64.11%~67.48%), 富 Na_2O(5.76%~6.07%, Na_2O/K_2O=2.89~10.37)、贫 K_2O(0.58%~2.03%), 高Al_2O_3(15.79%~17.12%)、CaO(3.34%~5.22%) 和 MgO(1.47%~2.01%, $Mg^{\#}$=58.79~64.73), 属于准铝质低钾拉斑-中钾钙碱性系列岩石, 与I型花岗岩类似(图3). 它们具微弱的负Eu异常(δEu=0.82~0.99)、LREE富集的右倾稀土模式, 富集LILEs、亏损HFSEs(Nb, Ta, P和Ti), 同时具有高Sr(455.39~671.33 ppm)和Sr/Y(73.73~94.88)、低Y(6.17~7.39 ppm)和Yb(0.53~0.66 ppm)的特征(图3(d)). 地球化学特征(图3, 4)及正的锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值(6.7~10.3)(图5)共同表明其为一套洋壳型埃达克岩, 可能是南阿尔金早古生代洋壳俯冲过程中发生部分熔融的产物(康磊, 2015).

第二期花岗质岩石的侵位时代(501~496 Ma)与区内高压-超高压岩石的峰期变质时代基本一致. 该期花岗岩 SiO_2(66.79%~68.65%)、全碱 Alk((Na_2O+K_2O)=6.32%~6.88%) 含量稳定, 富 Al_2O_3(17.48~18.31%, A/CNK=1.01~1.06)和CaO(3.64%~4.48%)、贫MgO(0.59%~0.98%, $Mg^{\#}$=45.3~46.4), 属于弱过铝质中钾钙碱性岩石系列, 类似于I型花岗岩(图3). 岩石富集LREE, 轻重稀土分馏强度中等, 具有弱的Eu正异常(δEu=1.15~1.31), 相对富集LILEs而亏损HFSEs(图4). 此外, 和第一期花岗岩类似, 这一期花岗岩也具有高Sr(700~842 ppm)和Sr/Y(91.52~162.48), 低Y(4.31~7.66 ppm)和Yb(0.44~1.09 ppm)的特征, 指示其亦具有埃达克质花岗岩的属性(图3(d)); 但不同之处在于这一期花岗岩锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$值变化范围大(–5.7~5.9), 除个别为正值外主体为负值(图5), 表明其源区物质主要来自于陆壳. 因此, 这一期花岗岩应形成于南阿尔金陆壳深俯冲导致地壳加厚背景下的下地壳部分熔融, 其源区可能受到幔源组分的混染(Kang等, 2014; 康磊, 2015; 孙吉明等, 2012).

第三期花岗质岩浆岩的形成时代(462~451 Ma)与区内超高压岩石早期退变质时代(~450 Ma)一致, 广泛分布于南阿尔金地区, 是区内早古生代最为强烈的一期花岗岩浆活动. 该期花岗岩普遍具有富SiO_2、全碱Alk和Al_2O_3, 贫MgO, CaO与TiO_2的地球化学组成, 属于过铝质高钾钙碱性岩石系列, 类似于S型花岗岩(曹玉亭等, 2010; 杨文强等, 2012a; 康磊等, 2013)(图3). 稀土配分模式也一致具有高度富集LREE、亏损HREE和中等负Eu异常的“右倾海鸥型”特征, 同时富集K, Rb, Th和U等大离子亲石元素(LILEs)、亏损Nb, Ta, P和Ti等高场强元素(HFSEs)(图4). 该期花岗质岩石的Nb/Ta比值介于10.06~17.74, 平均为15.54, 接近上地壳平均值(Rudnick和Gao, 2003); Zr/Hf比值变化范围介于29.25~37.45, 平均为30.11, 也接近于上地壳Zr/Hf比值(Rudnick和Gao, 2003), 此外其稀土配分模式和微量元素蛛网图也非常类似中上地壳的平均组成(Rudnick和Gao, 2003),

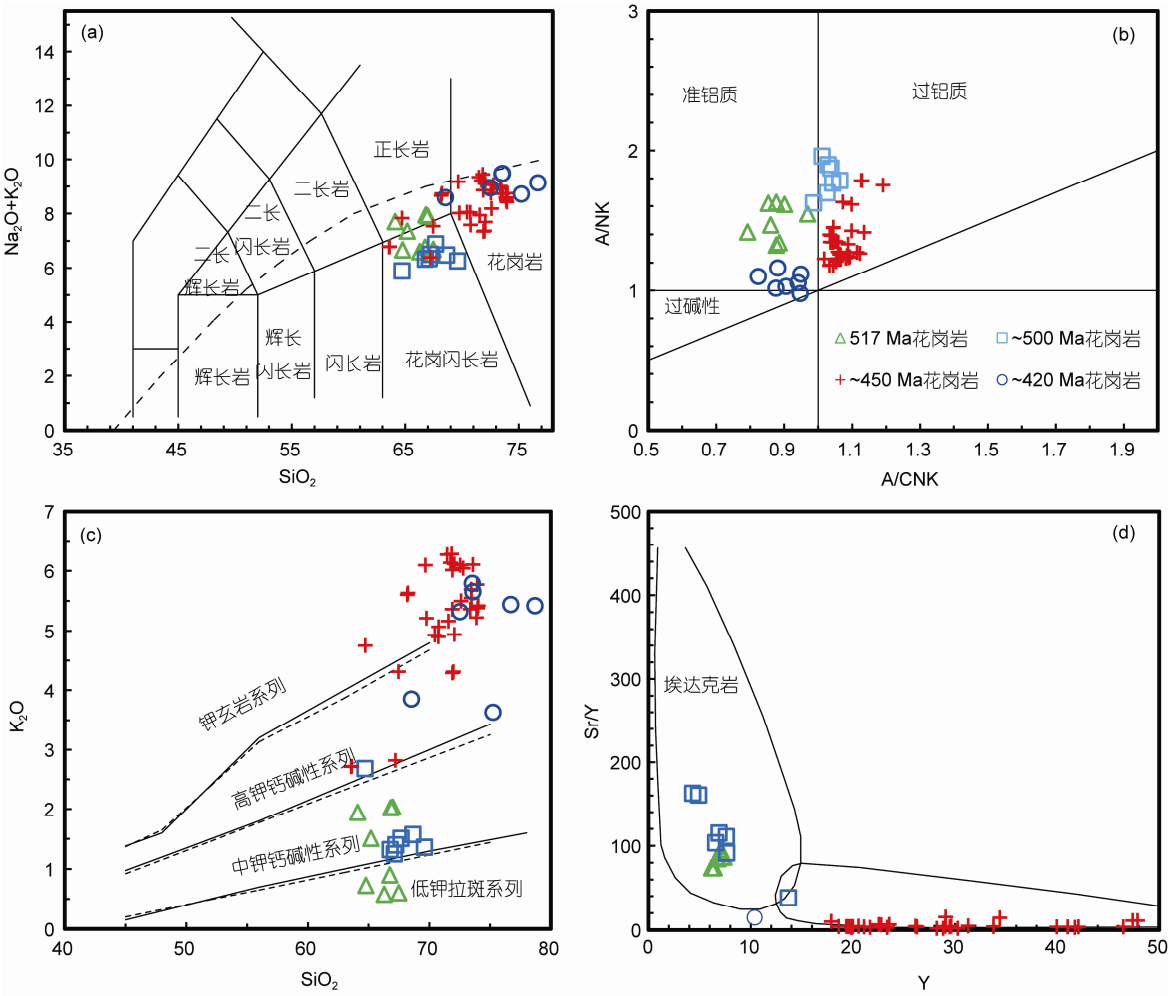


图 3　南阿尔金早古生代花岗质岩石的地球化学分类

(a) Na_2O+K_2O-SiO_2 图; (b) A/NK-A/CNK 图; (c) K_2O-SiO_2 图; (d) Sr/Y-Y 图. 数据来自表 1 中参考文献

结合其锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$几乎均为负值(图5)的特征综合分析, 其源区主要是来自陆壳物质的部分熔融. 部分熔融条件估算及源区性质恢复结果表明, 该期花岗质岩石主体是中上地壳沉积岩类在温度>800℃的条件下部分熔融的产物(曹玉亭等, 2010; 康磊等, 2013; 杨文强等, 2012a). 结合南阿尔金超高压变质岩在~450 Ma发生第一期退变质作用, 以及区内还发育同期镁铁-超镁铁质岩(董洪凯等, 2014; 马中平等, 2009, 2011), 这一期花岗质岩石的形成可能主要是深俯冲陆壳板片断离后幔源物质上涌导致中上地壳物质部分熔融的产物, 对应于由碰撞挤压向伸展抬升转换过程中应力释放初级的构造地质背景.

第四期花岗岩浆作用的时代(426~385 Ma)与区内高压-超高压变质岩角闪岩相退变质时代相当, 主要以无任何变形的岩株或岩脉出露, 出露在南阿尔金主断裂带内部或以南. 该期花岗岩以高SiO_2、高K_2O或高碱为特征, 属于准铝质高钾钙碱性系列岩石(图3). 轻重稀土弱到中等分馏、具有中等到强的负Eu异常, 同时富集LILEs(图4). 其中, 一些岩石还有A型花岗岩的特征(王超等, 2008; 吴才来等, 2014; 吴锁平等, 2007), 表明早古生代末期南阿尔金造山带已进入造山后阶段, 并经历了地壳连续伸展减薄的过程.

4　构造地质意义

一般来说, 造山带板块俯冲过程中, 陆壳通常是

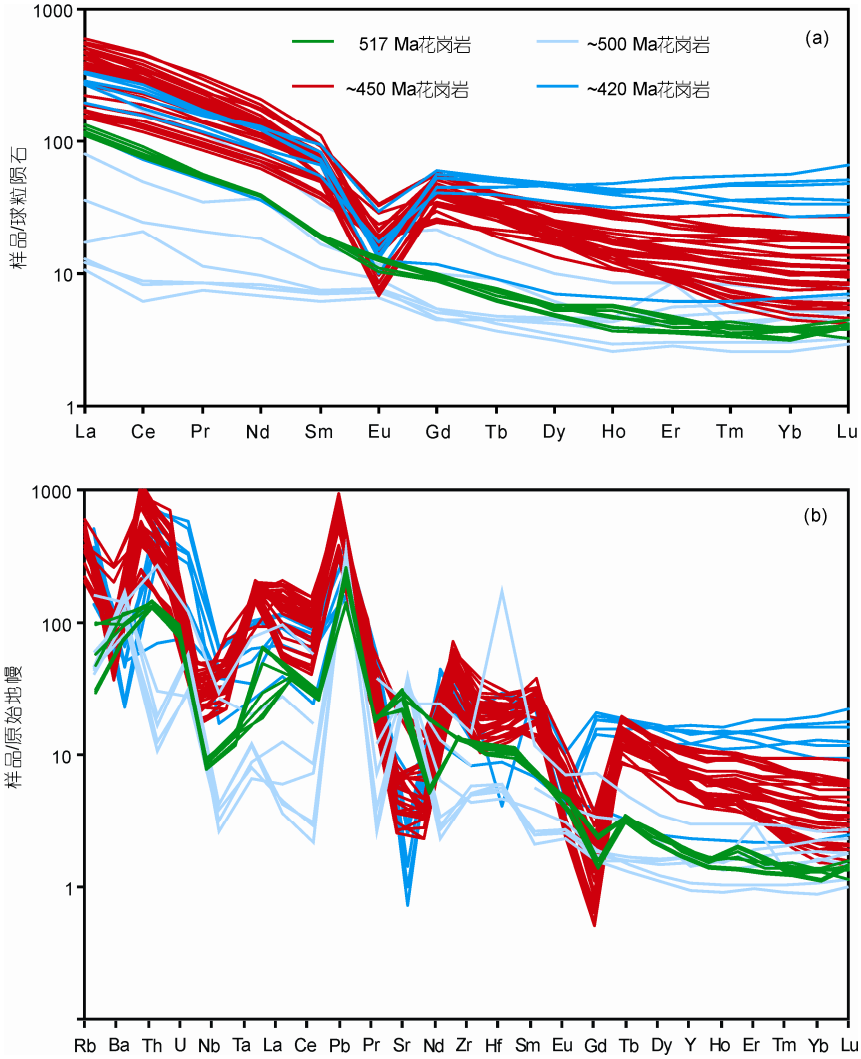


图 4　南阿尔金早古生代花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化图(a)和微量元素原始地幔标准化图(b)

球粒陨石稀土元素含量引自文献 Sun 和 Mcdonough(1989), 地球化学数据来自表 1 中的参考文献

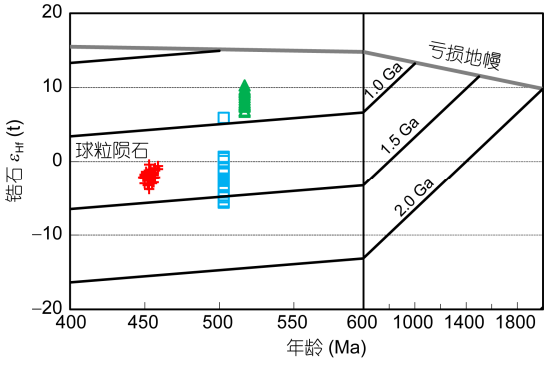


图 5　南阿尔金早古生代花岗岩的$\varepsilon_{Hf}(t)$-年龄图

图例见图 3, 资料来源: ~517 Ma, 康磊(2015); 501 Ma, Kang 等(2014); ~450 Ma, 曹玉亭等(2010)、杨文强等(2012b)和康磊等(2013)

受到先期深俯冲洋壳拖曳而开始俯冲并发生碰撞的, 其主要驱动力来自已经发生俯冲洋壳的“拖曳或拉力”(Dai等, 2014, 2015; Turcotte和Schubert, 2014; Ye等, 2000; Zhou等, 2014; 李忠海, 2014). 作为典型的早古生代大陆俯冲碰撞造山带, 南阿尔金高压-超高压变质岩石的研究已表明, 该地区经历了陆壳深俯冲及其后连续两次抬升的构造演化过程(Liu等, 2012). 然而, 目前关于拖曳陆壳发生深俯冲的先期洋盆演化历史的研究还十分有限, 尽管该洋盆存在时限主体≥500 Ma得到了较好限定, 但如洋盆发育扩张、俯冲、闭合时限等仍知之甚少. 新近, 区内迪木那里克火山角砾岩(622.6±1.4) Ma形成年龄的获得,

为该洋盆开启扩张时代的上限提供了较好约束(杨文强等, 2012b), 阿帕-茫崖蛇绿混杂岩带中蛇绿岩型镁铁-超美铁质岩石即为这一洋盆残片的物质记录(刘良, 1999; 王焰等, 1999). 此外, 南阿尔金早古生代洋壳俯冲所形成埃达克岩(~517 Ma)的精确定年与区内长沙沟510 Ma蛇绿岩辉长岩的发现(郭金城等, 2014), 进一步为该地区早古生代蛇绿岩的形成时代和先期洋壳俯冲作用的时限提供了直接约束(康磊, 2015). 这一结果与区内高压-超高压岩石峰期变质时代的对比表明, 陆壳深俯冲引发的高压-超高压峰期变质时代(~500 Ma)作用滞后这一事件约10 Myr, 表明南阿尔金早古生代时期由洋壳俯冲转换为陆壳俯冲可能是一个连续的构造演化过程.

结合区内已发表的花岗岩、镁铁-超镁铁质岩、高压-超高压变质作用研究成果综合分析, 本文将南阿尔金早古生代俯冲碰撞杂岩带的构造演化过程划分为4个阶段: (1) 洋壳俯冲阶段, ≥517~500 Ma, 洋壳俯冲过程中部分熔融形成洋壳型埃达克岩; (2) 陆壳深俯冲阶段, 先期南阿尔金洋拖曳陆壳发生深俯冲作用, 在504~487 Ma形成了南阿尔金广泛分布的高压-超高压变质岩石及少量的陆壳型埃达克质岩石; (3) 俯冲陆壳发生板片断离并开始折返, 区内构造由碰撞挤压转换为伸展体制, 导致高压-超高压变质岩石在462~451 Ma发生退变质作用, 并产生同折返或后碰撞花岗岩(包括镁铁-超镁铁质岩); (4) 碰撞后伸展阶段, 高压-超高压变质岩石进一步发生角闪岩相退变质作用, 并产生426~385 Ma的花岗质岩浆作用, 包括部分A型花岗岩的形成.

5 结语

南阿尔金俯冲碰撞杂岩带发育~517, ~500, ~450和~420 Ma的四期花岗质岩石. 其中, ~517 Ma埃达克岩解释为先期俯冲洋壳部分熔融的产物, ~500 Ma埃达克质花岗岩认为是形成于陆壳深俯冲导致地壳加厚背景下的下地壳部分熔融, ~450 Ma花岗岩产生于由陆壳俯冲碰撞挤压向伸展抬升转换过程中应力释放导致的中上地壳物质部分熔融, 420~385 Ma花岗岩形成于造山后的伸展减薄阶段. 其中, ~517 Ma洋壳型埃达克岩为南阿尔金洋壳俯冲作用时限提供了直接约束. 陆壳深俯冲形成的高压-超高压峰期变质时代504~487 Ma, 滞后洋壳俯冲事件约10 Myr, 表明区内早古生代时期由洋壳俯冲转换为陆壳俯冲可能是一个连续的构造演化过程. 这四期花岗质岩石与区内蛇绿岩型镁铁-超镁铁质岩石以及高压-超高压变质岩石的形成, 共同记录了南阿尔金早古生代时期从大洋俯冲、之后的大陆深俯冲碰撞再到后来深俯冲陆壳折返抬升的完整的构造演化过程.

参考文献

曹玉亭, 刘良, 王超, 陈丹玲, 张安达. 2009. 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, 25: 2260–2270

曹玉亭, 刘良, 王超, 杨文强, 朱小辉. 2010. 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, 26: 3259–3271

车自成, 刘良, 罗金海. 2002. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社

陈有炘, 裴先治, 陈国超, 李瑞保, 刘战庆, 刘智刚, 丁仨平, 李佐臣, 张晓飞, 郭俊锋. 2011. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石U-Pb年龄. 现代地质, 25: 510–521

董洪凯, 郭金城, 陈海燕, 提振海, 刘广, 刘思林, 薛鹏远, 邢伟伟. 2014. 新疆阿尔金地区长沙沟一带奥陶纪侵入岩及其演化特征. 西北地质, 47: 73–87

高晓峰, 校培喜, 谢从瑞, 范立勇, 过磊, 奚仁刚. 2010. 东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb定年及其地质意义. 地质通报: 1001–1008

郭金城, 徐旭明, 陈海燕, 李先, 董洪凯, 提振海. 2014. 新疆阿尔金长沙沟超镁铁质岩锆石U-Pb年龄及其地质意义. 西北地质, 47: 170–177

何国琦, 李茂松, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 43–47

胡云绪, 校培喜, 高晓峰, 谢从瑞, 奚仁刚, 董增产, 过磊, 康磊. 2010. 东昆仑西段-阿尔金地区区域地层划分及地层时空格架建立. 西北地质, 43: 152–158

康磊, 刘良, 曹玉亭, 王超, 杨文强, 梁莎. 2013. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克复式花岗质岩体东段片麻状花岗岩的地球化学特征、锆石

U-Pb定年及其地质意义. 岩石学报, 29: 3039–3048
康磊. 2015. 南阿尔金高压-超高压变质带早古生代多期花岗质岩浆作用及其地质意义. 博士学位论文. 西安: 西北大学. 129
赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 青藏高原北缘火山作用与构造演化. 西安: 陕西科学技术出版社. 74–96
李瑞保. 2012. 东昆仑造山带(东段)晚古生代-早中生代造山作用研究. 博士学位论文. 西安: 长安大学. 185
李向民, 马中平, 孙吉明, 徐学义, 雷永孝, 王立社, 段星星. 2009. 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, 25: 862–872
李忠海. 2014. 大陆俯冲-碰撞-折返的动力学数值模拟研究综述. 中国科学: 地球科学, 44: 817–843
刘良, 陈丹玲, 张安达, 孙勇, 王焰, 杨家喜, 罗金海. 2005. 阿尔金超高压(>7 GPa)片麻状(含)钾长石榴辉石岩. 中国科学: 地球科学, 35: 105–114
刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 王建其, 高章鉴. 1998. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的Sm-Nd等时线年龄证据. 科学通报, 43: 880–883
刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 陈丹玲. 1999. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. 岩石学报, 15: 57–64
刘良. 1999. 阿尔金高压变质岩与蛇绿岩及其大地构造意义. 博士学位论文. 中国科学院地质与地球物理研究所. 29–36
刘良, 孙勇, 车自成, 罗金海, 陈丹玲, 王焰, 张安达, 陈亮, 肖培喜, 王永合. 2002. 阿尔金发现超高压(>3.8 GPa)石榴二辉橄榄岩. 科学通报, 47: 657–662
刘良, 孙勇, 罗金海, 王焰, 陈丹玲, 张安达. 2003. 阿尔金英格利萨依花岗质片麻岩超高压变质. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 1184–1192
刘良, 张安达, 陈丹玲, 杨家喜, 罗金海, 王超. 2007. 阿尔金江尕勒萨依榴辉岩和围岩锆石LA-ICP-MS微区原位定年及其地质意义. 地学前缘, 14: 98–107
刘良, 曹玉亭, 陈丹玲, 张成立, 杨文强, 康磊, 廖小莹. 2013. 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, 58: 2113–2123
龙晓平, 金巍, 葛文春, 余能. 2006. 东昆仑金水口花岗岩体锆石U-Pb年代学及其地质意义. 地球化学, 35: 367–376
陆露, 张延林, 吴珍汉, 胡道功. 2013. 东昆仑早古生代花岗岩锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地球学报: 447–454
马中平, 李向民, 孙吉明, 徐学义, 雷永孝, 王立社, 段星星. 2009. 阿尔金山南缘长沙沟镁铁-超镁铁质层状杂岩体的发现与地质意义——岩石学和地球化学初步研究. 岩石学报: 793–804
马中平, 李向民, 徐学义, 孙吉明, 唐卓, 杜涛. 2011. 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, 38: 1071–1078
潘桂堂, 陈智梁, 许效松. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社
孙吉明, 马中平, 唐卓, 李向民. 2012. 阿尔金南缘鱼目泉岩浆混合花岗岩LA-ICP-MS测年与构造意义. 地质学报, 86: 247–257
唐卓, 马中平, 李向民, 孙吉明. 2011. 阿尔金山南缘清水泉地区斜长角闪岩锆石LA-ICP-MS U-Pb测年及其地质意义. 地质通报, 30: 51–57
王超, 刘良, 张安达, 杨文强, 曹玉亭. 2008. 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, 24: 2809–2819
王焰, 刘良, 车自成, 陈丹玲, 罗金海. 1999. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的地球化学特征. 地质论评, 45: 1010–1014
魏春景, 张颖慧. 2008. 俯冲大洋岩石圈的相转变与俯冲带岩浆作用. 科学通报, 53: 2449–2459
吴才来, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, B Ronald Frost, Joseph L Wooden. 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石SHRIMP U-Pb定年、Lu-Hf同位素特征及岩石成因. 岩石学报: 2297–2323
吴锁平, 吴才来, 陈其龙. 2007. 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, 26: 1385–1392
新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社
杨文强, 刘良, 丁海波, 校培喜, 曹玉亭, 康磊. 2012a. 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, 28: 4139–4150
杨文强, 丁海波, 刘良, 校培喜, 曹玉亭, 康磊, 梁莎, 廖小莹, 王亚伟. 2012b. 新疆阿尔金南部迪木那里克铁矿赋矿地层的形成时代及其地质意义. 地质通报, 31: 2090–2101
张建新, 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 崔军文. 2001. 阿尔金西段榴辉岩岩石学、地球化学和同位素年代学研究及其构造意义. 地质学报, 75: 186–197
赵子福, 郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 888–909
Castillo P R. 2012. Adakite petrogenesis. Lithos, 134–135: 304–316
Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F. 2014. Geochemical insights into the role of metasomatic hornblendite in generating alkali basalts. Geochem Geophys Geosyst, 15: 3762–3779
Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F. 2015. Tectonic development from oceanic subduction to continental collision: Geochemical evidence from

postcollisional mafic rocks in the Hong'an-Dabie orogens. Gondwana Res, 27: 1236–1254
Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662–665
Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. Nature, 385: 219–229
Kang L, Liu L, Wang C, Cao Y T, Yang W Q, Wang Y W, Ying L X. 2014. Geochemistry and zircon U-Pb dating of Changshagou adakite from the South Altyn UHPM Terrane: Evidence of the partial melting of the lower crust. Acta Geol Sin-Engl Ed, 88: 1454–1465
Liu L, Che Z C, Luo J H, Wang Y, Gao Z J. 1997. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang. Chin Sci Bull, 42: 931–934
Liu L, Sun Y, Xiao P X, Che Z C, Luo J H, Chen D L, Wang Y, Zhang A D, Chen L, Wang Y H. 2002. Discovery of ultrahighpressure magnesite-bearing garnet lherzolite (>3.8 GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China. Chin Sci Bull, 47: 881–886
Liu L, Zhang A D, Chen D L, Yang J X, Luo J H, Wang C. 2007a. Implications based on LA-ICP-MS Zircon U-Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi Area, Altyn Tagh, China. Earth Sci Front, 14: 98–107
Liu L, Zhang J F, Green Ii H W, Jin Z M, Bozhilov K N. 2007b. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments, implying subduction to >350 km. Earth Planet Sci Lett, 263: 180–191
Liu L, Wang C, Chen D L, Zhang A D, Liou J G. 2009. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the South Altyn Tagh, northwestern China. J Asian Earth Sci, 35: 232–244
Liu L, Yang J X, Chen D L, Wang C, Zhang C L, Yang W Q, Cao Y T. 2010. Progress and controversy in the study of HP-UHP metamorphic terranes in the West and Middle Central China orogen. J Earth Sci-China, 21: 581–597
Liu L, Wang C, Cao Y T, Chen D, Kang L, Yang W Q, Zhu X H. 2012. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China. Lithos, 136-139: 10–26
Lu S N, Li H K, Zhang C L, Niu G H. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments. Precambrian Res, 160: 94–107
Pitcher W S. 1983. Granite type and tectonic environment. Mt Build Processes, 19: 40
Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. Treatise Geochem, 3: 1–64
Rumble D, Liou J G, Jahn B M. 2003. Continental crust subduction and ultrahigh pressure metamorphism continental. Treatise Geochem, 3: 293–319
Song S G, Niu Y L, Su L, Zhang C, Zhang L F. 2014a. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China. Earth-Sci Rev, 129: 59–84
Song S G, Niu Y L, Su L, Wei C J, Zhang L F. 2014b. Adakitic (tonalitic-trondhjemitic) magmas resulting from eclogite decompression and dehydration melting during exhumation in response to continental collision. Geochim Cosmochim Acta, 130: 42–62
Sun S S, Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geol Soc Lond Spec Publ, 42: 313–345
Turcotte D L, Schubert G. 2014. Geodynamics. Cambridge: Cambridge University Press
Wang C, Liu L, Chen D L, Cao Y T. 2011. 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, Wallis S, eds. UHPM: 25 Years After Discovery of Coesite and Diamond. Amsterdam: Elsevier. 541–577
Wang C, Liu L, Xiao P X, Cao Y T, Yu H Y, Meert J G, Liang W T. 2014b. Geochemical and geochronologic constraints for Paleozoic magmatism related to the orogenic collapse in the Qimantagh-South Altyn region, northwestern China. Lithos, 202–203: 1–20
Wang M J, Song S G, Niu Y L, Su L. 2014a. Post-collisional magmatism: Consequences of UHPM terrane exhumation and orogen collapse, N. Qaidam UHPM belt, NW China. Lithos, 210–211: 181–198
Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X, Jiang M, Li H B, Cui J W. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun Sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing (in Chinese with English abstract). Acta Geol Sin, 73: 193–205
Ye K, Cong B L, Ye D N. 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. Nature, 407: 734–736
Zhang A D, Liu L, Sun Y, Chen D L, Wang Y, Luo J H. 2004. SHRIMP U-Pb zircon ages for the UHP metamorphosed granitoid gneiss in Altyn Tagh and their geological significance. Chin Sci Bull, 49: 2527–2532
Zhang H F, Yu H, Zhou D W, Zhang J, Dong Y P, Zhang G W. 2014. The meta-gabbroic complex of Fushui in north Qinling orogen: A case of syn-subduction mafic magmatism. Gondwana Res, 28: 262–275
Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, Yang J S, Cui J W. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. Lithos, 56: 187–206
Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q, Meng F C, Li H B, Shi R D. 2002. Evidence for UHP metamorphism of eclogites from the Altun Mountains. Chin

Sci Bull, 47: 751–755

Zhang J X, Meng F C. 2005. Sapphirine-bearing high pressure mafic granulite and its implications in the south Altyn Tagh. Chin Sci Bull, 50: 265–269

Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J, Dai L Q, Li Q L, Liu X M. 2012. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen. Chem Geol, 328: 70–88

Zhao Z F, Dai L Q, Zheng Y F. 2013. Postcollisional mafic igneous rocks record crust-mantle interaction during continental deep subduction. Scientific Reports 3, Article number: 3413, doi: 10.1038/srep03413

Zheng Y F, Fu B, Gong B, Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. Earth-Sci Rev, 62: 105–161

Zheng Y F. 2009. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. J Geol Soc Lond, 166: 763–782

Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, Gao X Y. 2011. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Earth-Sci Rev, 107: 342–374

Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chem Geol, 328: 5–48

Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C. 2013. Introduction to tectonics of China. Gondwana Res, 23: 1189–1206

Zhou L G, Xia Q X, Zheng Y F, Chen R X, Hu Z, Yang Y. 2014. Tectonic evolution from oceanic subduction to continental collision during the closure of Paleotethyan ocean: Geochronological and geochemical constraints from metamorphic rocks in the Hong'an orogen. Gondwana Res, 28: 348–370