中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 2 期: 154 ~ 165
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

西准噶尔克拉玛依增生楔形成机制

杨高学*, 李永军, 佟丽莉, 李甘雨

长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

* E-mail: mllygx@126.com

收稿日期: 2016-05-16; 接受日期: 2016-08-08; 网络版发表日期: 2017-01-04
国家自然科学基金项目(批准号: 41303027)、陕西省青年科技新星计划项目(编号: 2016KJXX-71)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号: 310827153506, 310827153407)资助

摘要 增生楔是板块俯冲过程中的特征性产物. 确定增生楔的产出部位、物质组成及形成机制, 对揭示与板块俯冲有关的构造过程具有重要指示意义. 中亚造山带是世界上最大的增生型造山带之一, 它记录了古亚洲洋从产生到闭合的整个演化历程, 伴随着多期次、多类型的壳幔相互作用. 地处中亚造山带腹地的西准噶尔地区在古生代处于洋内弧演化阶段, 是研究中亚造山带的关键地区. 西准噶尔东部地区发育泥盆-石炭纪海相沉积岩、达尔布特及克拉玛依蛇绿混杂岩、碱性洋岛玄武岩、岛弧火山岩及逆冲推覆构造, 具有典型的增生楔特征. 本文在详细的岩石岩相学、构造地质学和火山岩地球化学研究基础上, 结合大洋俯冲隧道过程, 深入剖析克拉玛依增生楔的形成机制, 发现西准噶尔克拉玛依增生楔是多阶段、多成因混杂堆积体. 大洋俯冲隧道模型在西准噶尔克拉玛依增生楔的应用将为中亚造山带的陆壳增生及造山作用研究提供新的思路.

关键词 洋壳, 俯冲带, 地球化学, 洋岛玄武岩, 蛇绿混杂岩, 增生楔, 西准噶尔

1 引言

板块俯冲带是汇聚板块界面发生相互作用的构造带(Stern, 2002; Zheng, 2012), 它从地壳表层延伸到地幔深部. 增生楔是板块俯冲过程中在浅部形成的特征性产物, 由俯冲板块顶部物质经刮削加积作用而形成, 以构造混杂岩形式拼贴于上覆板块边缘的楔形地质体(Davis等, 1983; Moore和Silver, 1987; Dahlen, 1990; Zheng等, 2005). 在汇聚板块边界常发育不同时代、不同成因构造混杂岩组成的增生楔, 如南蒙古构造带(Şengör等, 1993)、俄罗斯南乌拉尔造山带(Brown和Spadea, 1999)和中国大别-苏鲁造山带(Zheng等, 2005)等典型的板块俯冲/碰撞带均有产出. 在增生楔之下的就是俯冲隧道(Cloos和Shreve, 1988a, 1988b), 它是下伏俯冲板片与上覆板片之间的自由空间, 其中含有相向运动的地壳地幔物质, 并存在相互作用(Zheng, 2012; 郑永飞等, 2013, 2015; Li Z H等, 2015), 俯冲隧道深部物质在折返过程中, 可能底垫到增生楔底部. 更为重要的是为解释从浅部增生楔到深部俯冲带的构造地质提供了参考模型(Beaumont等, 1999; Gerya等, 2002; Guillot等, 2009).

中亚造山带是世界上最大的增生型造山带之一

中文引用格式: 杨高学, 李永军, 佟丽莉, 李甘雨. 2017. 西准噶尔克拉玛依增生楔形成机制. 中国科学: 地球科学, 47: 154–165, doi: 10.1360/N072016-00163
英文引用格式: Yang G X, Li Y J, Tong L L, Li G Y. 2017. The formation mechanism of accretionary wedge at Karamay in West Junggar, NW China. Science China Earth Sciences, 60: 546–556, doi: 10.1007/s11430-016-5163-6

© 2017 《中国科学》杂志社

(图1a), 它记录了古亚洲洋从产生到闭合的整个过程(Şengör等, 1993; Jahn, 2004), 其由一系列岛弧、微地块、蛇绿岩、俯冲增生体及海山组成(Windley等, 2007; Xiao等, 2008, 2010; Wilhem等, 2012; Kröner等, 2014; Yang等, 2015a). 然而, 对中亚造山带形成的地球动力学过程存在争议, 主要有以下几种不同认识: (1) 单个岛弧俯冲(Şengör等, 1993; Yakubchuk等, 2005); (2) 多阶段俯冲增生(Xiao等, 2008, 2009, 2010; Choulet等, 2016); (3) 洋脊俯冲模式(Windley等, 2007; Jian等, 2008; Tang等, 2012); (4) 地幔柱作用(Zhou等, 2009; Zhang等, 2010). 但无论哪种模式, 普遍的共识认为古亚洲洋在闭合过程中必然发生了多次俯冲事件, 即古亚洲洋在演化过程中发育有类似于西南太平洋的多岛洋体系(Stern和Bloomer, 1992).

西准噶尔位于中亚造山带的腹地(图1b), 古生代处于洋内弧演化阶段(Wang等, 2003; Buckman和Aitchison, 2004; Geng等, 2009; Yin等, 2010; Zhang等, 2011a; Yang等, 2012a, 2012b, 2013; Choulet等, 2016), 发育从寒武纪至石炭纪的多条蛇绿混杂岩带及同期的火山岩(Feng等, 1989; Zhang等, 1993; Geng等, 2011; Zhu等, 2015), 而这些岩石的性质较为复杂, 如克拉玛依蛇绿混杂岩及地层中均发育MORB、IAB及OIB等特征的火山岩(Zhang等, 2011a; Yang等, 2015b). 另外, 前人研究主要集中于岩石学、同位素年代学、地球化学及构造环境等方面(Chen等, 2010, 2014; Ren等, 2014; Li D等, 2015), 而明显缺少对俯冲带地质过程的详细解剖. 因此, 本文在前人研究基础上, 从岩石岩相学、构造地质学及地球化学特征等方面系统研究克拉玛依增生楔属性, 试图详细剖析西准噶尔地区俯冲增生过程.

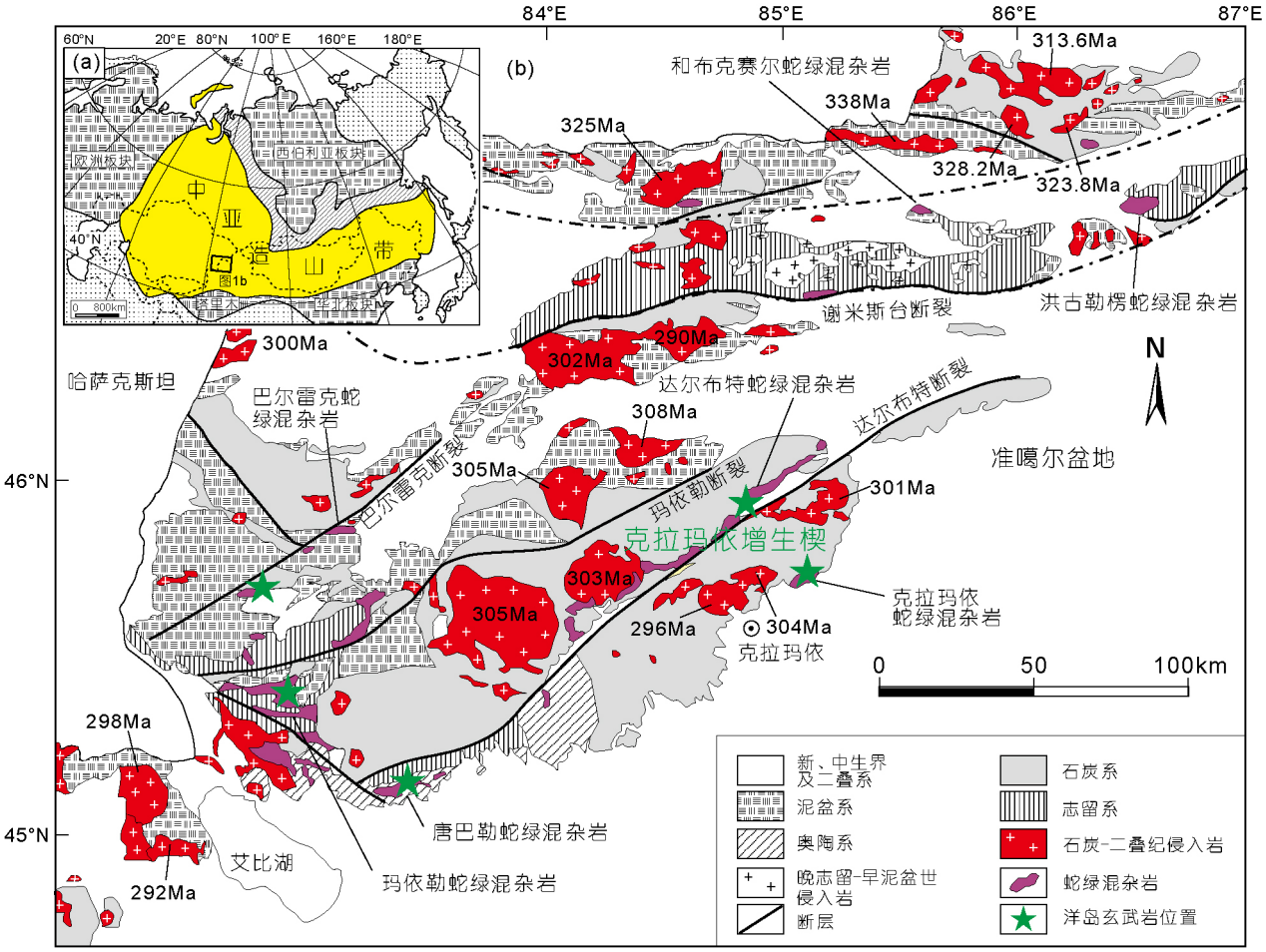

图 1　**中亚造山带构造格架图(a)及西准噶尔地质简图(b)**

(a) 据Jahn等(2000); (b) 据Yang等(2013)

2 地质概况

西准噶尔是中亚造山带的重要组成部分(图1b), 也是中亚-兴蒙巨型构造成矿域的一部分(朱永峰, 2014; 申萍等, 2015), 更是近年来研究中亚造山带的热点地区之一(Buckman和Aitchison, 2004; Chen和Arakawa, 2005; 周涛发等, 2006; 纵瑞文等, 2014; Yang等, 2015a, 2015b; Choulet等, 2016). 西准噶尔主要由一系列的增生杂岩带、古生代岩浆弧构成, 发育一系列NE-SW向断裂, 由北向南依次为巴尔雷克、玛依勒和达尔布特断裂, 它们控制着花岗岩类和蛇绿混杂岩的分布(图1b). 该地区出露大量晚古生代中酸性侵入体, 具有高正的$\varepsilon_{Nd}(t)$ (Chen和Jahn, 2004; Geng等, 2009). 此外, 发育多条形态复杂, 变形强烈及时代跨度大的蛇绿混杂岩带(Feng等, 1989; Zhang等, 1993; 杨高学等, 2015), 主要包括达尔布特、白碱滩、唐巴勒、玛依勒及巴尔雷克等蛇绿混杂岩带(图1b). 最新研究发现在这些蛇绿混杂岩带中均发育碱性洋岛玄武岩(Yang等, 2015a), 可能形成于大洋板内的海山环境(Yang等, 2012b, 2013, 2015b), 也有可能形成于俯冲带(Wong等, 2010; Zhang等, 2011a). 西准噶尔地区出露的地层主体为奥陶系至石炭系火山-沉积地层, 各地层单位多为断层接触, 在内部也发育系列断层, 致使中泥盆统库鲁木迪组, 下石炭统包古图组、太勒古拉组及希贝库拉斯组不连续分布, 其内部发育复杂褶皱(张继恩等, 2009). 沉积环境分析及化石显示该地区在晚石炭世仍然处于海相环境(宋春晖等, 1996). 古生代构造-岩浆活动复杂, 成矿作用丰富多样, 形成多种类型的金属矿床, 如斑岩型铜金矿床、斑岩-石英脉-云英岩型钨钼矿床、铜镍硫化物型矿床及豆荚状铬铁矿等(安芳和朱永峰, 2009; 刘玉琳等, 2009; 朱永峰, 2014).

3 克拉玛依增生楔地质特征

增生楔又称增生棱柱或增生杂岩, 前人详细研究大洋板块俯冲带增生楔的构造地质特征(周建波等, 2001; 郑永飞等, 2015), 主要有如下6方面: (1) 物质组成复杂, 由不同时代、不同来源、不同成分和性质的岩石共同叠置混杂构成, 主要组成包括沉积岩、岛弧火山岩、蛇绿混杂岩、海山(大洋岛屿或高原)及外来地质体(Wilson等, 1989; Osozawa, 1994; Isozaki, 1997; Dewey, 2003); (2) 发育完整的构造加积楔, 一般由变形前锋、增生楔体和拆离带等部分构成, 而增生楔体由顶部楔状体和底垫增生体两部分构成; (3) 以同斜褶皱-叠瓦状断层带-构造混杂岩等强变形岩石共同构成其特征性构造组合; (4) 发育从低绿片岩相到低角闪岩相的动力变质作用; (5) 主要通过楔体前锋加积作用的方式生长, 部分被带入地下较大深度的岩石通过底辟作用方式上侵到增生楔体的底部; (6) 增生楔内部发育泥质底辟侵位构造并存在大量热泉和热液活动, 造成增生楔岩石与流体之间发生强烈的化学作用. 西准噶尔东部地区在岩石组合、组成单元、构造特征及变质作用方面具有典型的增生楔特征(Zhang等, 2011b), 但热液活动较弱. 下面主要从岩石岩相学、构造地质学和火山岩地球化学三方面详细总结研究克拉玛依增生楔特征.

3.1 岩石岩相学特征

克拉玛依增生楔的岩石组成主要为泥盆-石炭纪地层和蛇绿混杂岩. 泥盆纪地层主要出露于达尔布特及克拉玛依蛇绿混杂岩内部, 属于海相火山岩沉积组合, 由细碧质枕状熔岩和放射虫硅质岩组成, 其中含生物灰岩夹层和透镜体及放射虫硅质岩(冯益民, 1985). 下石炭统分布在达尔布特断裂两侧, 主要为火山-沉积建造, 分为太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993). 太勒古拉组主要为凝灰岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质粉砂质泥岩及中基性熔岩, 包古图组主要为沉凝灰岩、凝灰质粉沙质泥岩、凝灰岩、砂岩及硅质岩(图2a), 而希贝库拉斯组主要为凝灰质含砾粗砂岩、凝灰质砂岩及粉砂岩等(图2b). 此外, 最新在达尔布特两侧的太勒古拉组中识别出熔积岩(郭召杰等, 2015).

蛇绿混杂岩有达尔布特及克拉玛依带, 岩石组成类似, 主要包括地幔岩(尖晶石二辉橄榄岩和少量辉石岩)、蚀变辉长岩、玄武岩和硅质岩, 局部发育火山角砾岩、碳酸盐岩及玄武岩枕(图2c和d). 尖晶石二辉橄榄岩主要由橄榄石、单斜辉石、斜方辉石及尖晶石组成, 橄榄石和斜方辉石均发生不同程度的蛇纹石化, 但尖晶石和单斜辉石保存完好(朱永峰和徐新, 2007). 在克拉玛依蛇绿混杂岩的二辉橄榄岩中单斜辉石和斜方辉石均发育出溶结构, 透辉石出溶顽火辉石, 斜方辉石出溶透辉石-普通辉石(朱永峰和徐新, 2007). 同时也发育白云石大理岩和石榴角闪岩(陈博等, 2008;

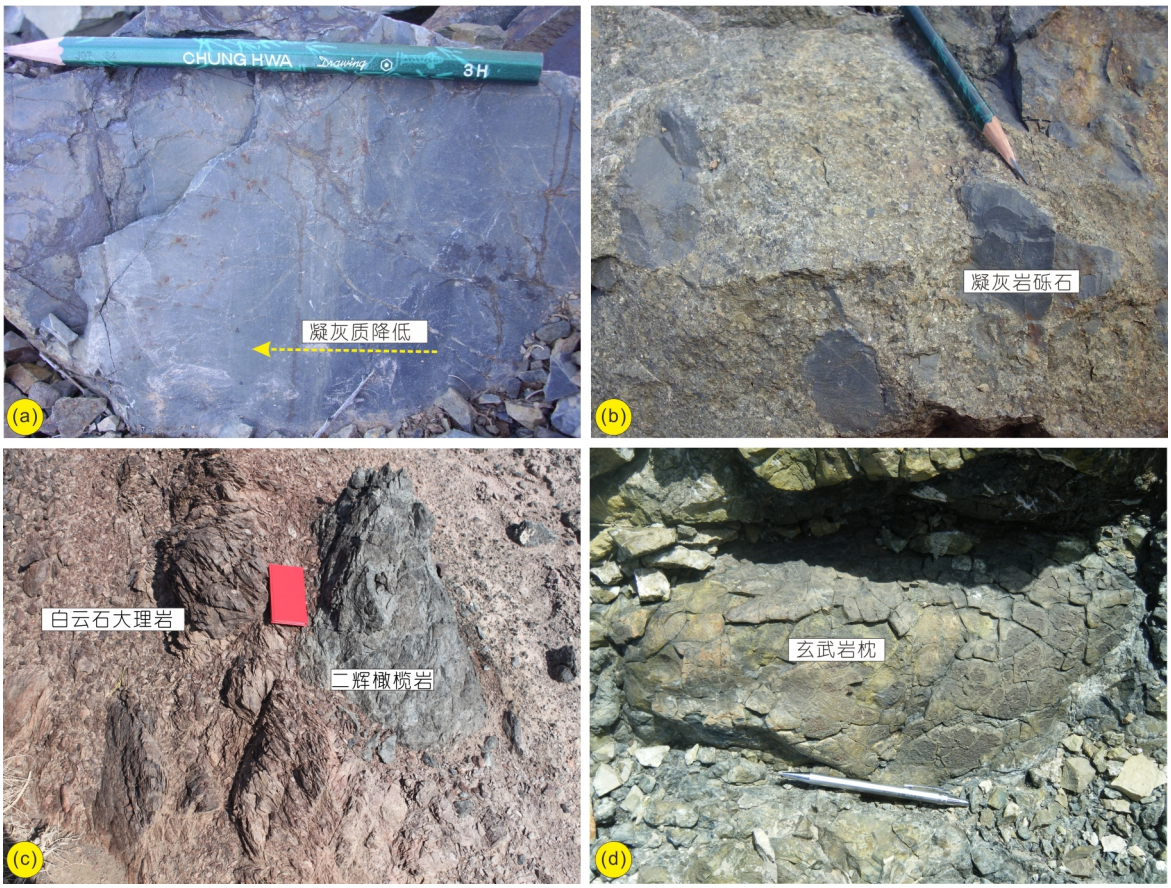

图 2　西准噶尔石炭系地层中凝灰质粉砂岩(a)及含砾粗砂岩(b)和克拉玛依蛇绿混杂岩中白云石大理岩(c)及玄武岩枕状构造(d)

朱永峰等, 2008), 前者是尖晶石二辉橄榄岩变质反应的产物, 即单斜辉石转变为白云石+石英+磁铁矿, 橄榄石和斜方辉石先转变为蛇纹石+磁铁矿, 蛇纹石再转变为白云石+石英+磁铁矿. 透辉石+CO_2 = 白云石+石英+磁铁矿以及蛇纹石+$CaCO_3$ = 白云石+石英+磁铁矿+H_2O, 这两个变质反应基本同时发生(朱永峰等, 2008). 后者是榴辉岩退变的产物(陈博等, 2008).

3.2　构造地质学特征

准噶尔盆地北西缘为延伸300km, 宽20~30km的推覆体构造带, 是晚石炭世以来形成的高角度叠瓦状逆冲推覆构造及多米诺式的左行走滑断裂(何登发等, 2006; 徐芹芹等, 2009; 杨庚等, 2011; 陈宣华等, 2015). 西准噶尔南部地区主要断裂有NE走向的达尔布特、玛依勒及巴尔雷克三条主干断裂, 倾向北西方向, 兼有走滑和逆冲性质(Wang等, 2003). 断裂带附近地层普遍发生强烈变形, 形成密集且陡立的劈理构造, 其在不同强度的变形域内, 密集程度不同, 但劈理的产状相对稳定, 在达尔布特断裂北侧发育走向100°左右劈理, 南侧为75°(张继恩等, 2009; Choulet等, 2012). 除了劈理构造, 还发育一系列与断层有关褶皱, 主要为直立褶皱和斜歪褶皱(图3a), 还有同斜褶皱, 同时也有复杂揉皱(图3b), 它们的轴面大部分倾向北西. 可见在克拉玛依北西一带发育系列复杂褶皱及逆冲断层, 这些构造形迹都是北西-南东向挤压应力作用结果.

蛇绿混杂岩带与石炭纪地层呈断层接触, 其内部的各个单元之间均为断层接触, 其内部广泛发育岩**块**-基质(block-in-matrix)构造(图3c), 大部分超基性岩石及部分凝灰岩和玄武岩作为基质, 而部分超基性岩、玄武岩、硅质岩和砂岩作为岩块产出, 在局部保留有玄武岩枕, 岩枕发生了倾斜, 大多倾向北西方向. 在超基性岩和玄武岩岩块之间发育软弱的凝灰岩基

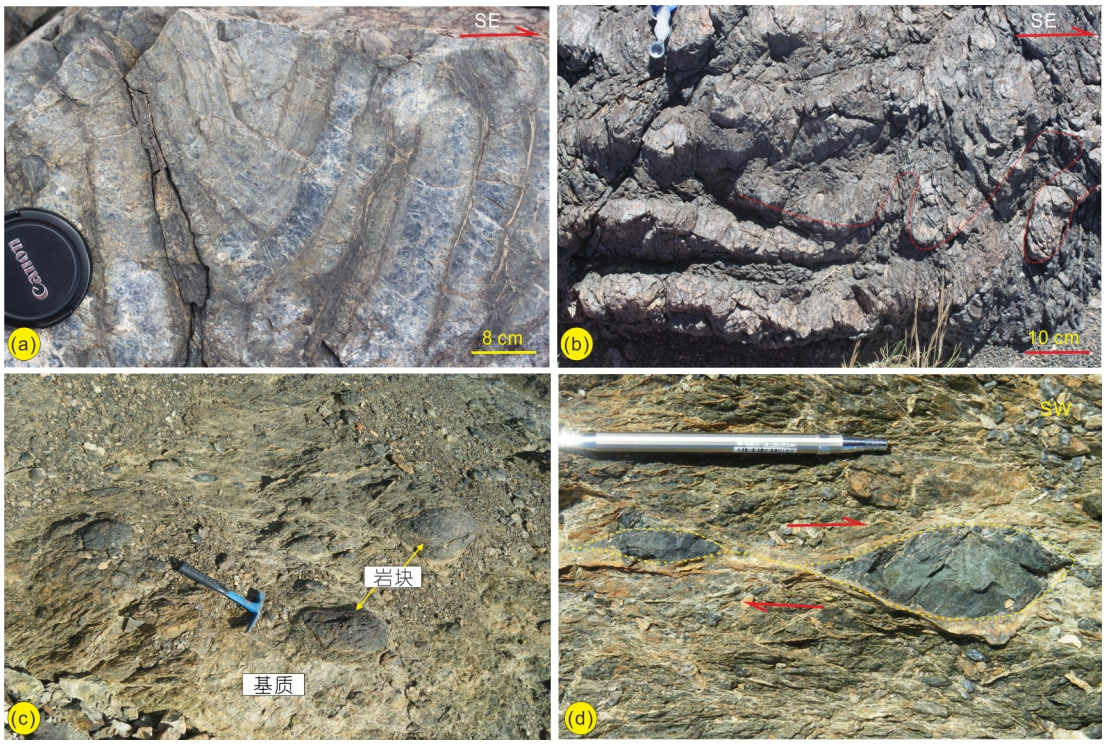

图 3　西准噶尔石炭系中直立紧闭褶皱(a)及复杂揉皱(b)和克拉玛依蛇绿混杂岩中岩块基质构造(c)及石香肠构造(d)

质, 其中发育明显的剪切现象, 与岩块构成明显的S-C组构, 具有向南东逆冲特点. 部分长条状或带状硅质岩块内部存在明显的错动, 呈书斜式排列, 倾向北西方向. 另外, 在硅质岩及超基性岩中发育布丁构造, 呈布丁状的岩块大小不等, 大多对称发育(图3d), 内部发育垂直于岩块长轴的脆性破裂, 被基质充填. 在凝灰岩中发育小型的S型褶皱, 指示存在南东向的剪切作用. 这些发育在蛇绿混杂岩内部书斜构造、S-C组构、S型拖曳褶皱及布丁构造等, 表明存在强烈的韧性剪切作用(Choulet等, 2012). 此外, 在混杂岩内部也发育倒转褶皱, 其轴面倾向南东, 表明它们的极性指向北西(张继恩等, 2009), 实际上, 这可能是后期构造作用的叠加或是主体南东向逆冲构造体系中伴生的次级构造. 可见蛇绿混杂岩内部构造现象复杂, 保存了多期构造事件的痕迹.

3.3　火山岩地球化学特征

克拉玛依增生楔的泥盆-石炭纪地层中以夹层产出玄武质岩石(图4a). Geng等(2011)和Tang等(2012)对其进行了详细的地球化学研究, 发现钙碱性及拉斑系列均有发育, 明显富集大离子亲石元素, 强烈亏损高场强元素, Eu异常不明显, 具有较一致的Sr-Nd同位素组成($(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$=0.7034~0.7054, $\varepsilon_{Nd}(t)$=4.2~7.7), 显示岛弧岩浆特征, 可能是俯冲洋壳释放的熔流体交代上覆地幔楔并部分熔融的产物(Tang等, 2012). 更为重要的是, 在石炭纪地层中以夹层产出的火山岩还有碱性玄武岩系列, 其具有较高的TiO_2(1.71~2.77%), 明显富集轻稀土元素($(La/Yb)_N$=5.8~11.7), 无明显的Nb、Ta、Ti负异常(图2b), 显示洋岛型玄武岩(OIB)特征(Zhang等, 2011a; 佟丽莉等, 2014), 可能来源于深部地幔, 即软流圈富集组分经过俯冲板片的板片窗交代上覆地幔楔并发生部分熔融形成(Zhang等, 2011a).

前人在达尔布特及克拉玛依蛇绿混杂岩方面积累大量的年代学及地球化学数据, 特别是火山岩地球化学研究(Wang等, 2003; Zhang等, 2011a; Yang等, 2013, 2015b). 玄武岩质岩石既有拉斑系列又有碱性系列(图4a和c), 前者相对低TiO_2(0.67~1.26%), 相对富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素(Nb、Ta和Ti)), 具有俯冲带岩浆特征(Buckman和Aitchison, 2004; Zhang等, 2011a; Yang等, 2012a). 后者相对高TiO_2(1.68~3.74%), 明显富

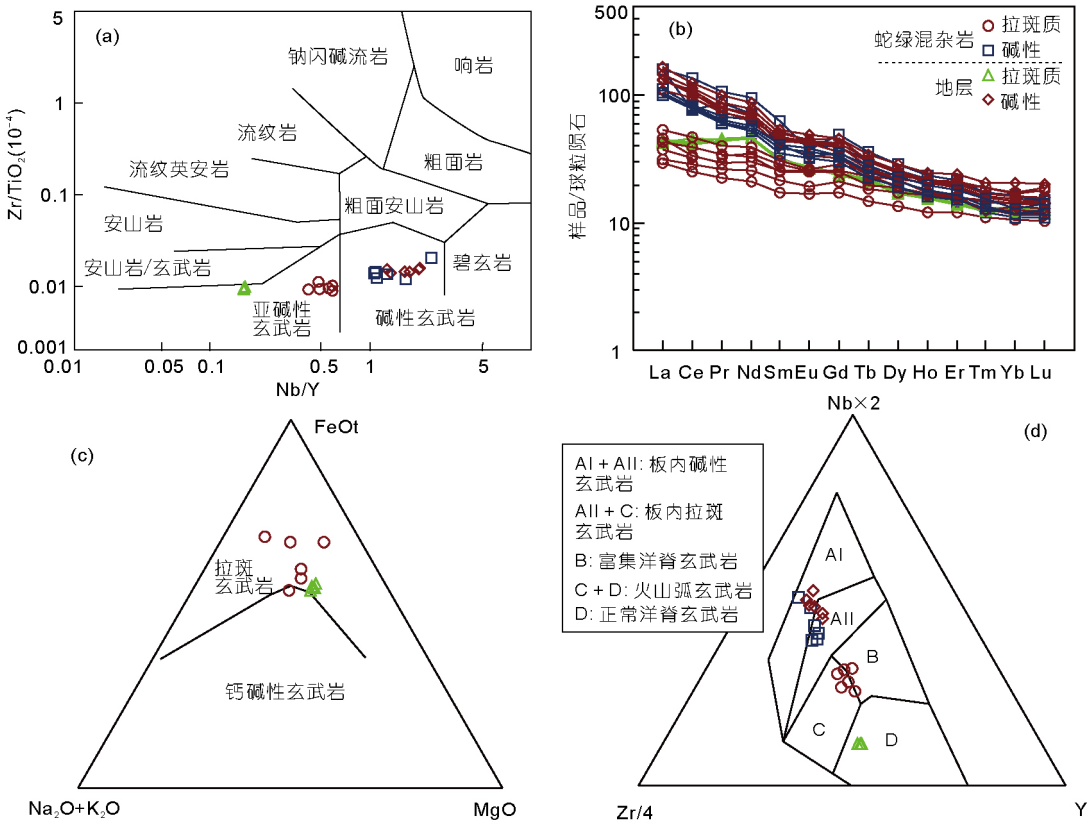

图 4　西准噶尔石炭系中火山岩及克拉玛依蛇绿混杂岩中玄武岩地球化学特征

(a) 据Winchester和Floyd(1977); (b) 球粒陨石据Sun和McDonough(1989); (c) 据Irvine和Baragar(1971); (d) 据Meschede (1986). 蛇绿混杂岩中玄武岩数据来自Yang等(2012c), 地层中火山岩夹层拉斑质据(Geng等, 2011), 碱性玄武岩据(Yang等, 2016).

集轻稀土元素和高场强元素, 具有典型OIB地球化学属性(图4b和d), 可能形成于海山(Yang等, 2013, 2015a), 这与中亚造山带内部发育不同时代的碱性玄武岩一致, 研究认为可能和大洋板内岩浆事件有关(Safonova和Santosh, 2014). 实际上, 这也与现代大洋比如太平洋及印度洋中热点形成的火山岛链相吻合(O'Neill等, 2003; Tarduno等, 2003).

4　增生楔形成机制

目前普遍认为西准噶尔在早二叠世之前处于洋内弧演化阶段(图5a和b), 根据上述构造地质学特征可以确定俯冲方向为南东向北西俯冲(Tang等, 2010; Yang等, 2012a), 当然也有学者认为沿着达尔布特断裂带存在双向俯冲(Zhang等, 2011b; Zhu等, 2015). 在洋壳俯冲过程中, 晚泥盆世至早石炭世洋壳及其上的沉积岩及部分海山被刮削下来, 通过加积方式转移至拆离带上部形成增生楔(图5c), 从而使得在蛇绿混杂岩带中可以找到洋壳各个单元的碎块及海山残片, 也正因为西准噶尔洋壳持续北西向俯冲, 导致克拉玛依增生楔中形成了一系列倾向北西的同斜褶皱-叠瓦状断层带-构造混杂岩等强变形构造组合. 除了被刮削形成增生楔之外, 大部分的洋壳及其上发育的海山都被带进了大洋俯冲隧道, 在其内部发生了复杂的壳幔相互作用(Zheng, 2012; 赵子福等, 2015). 另外, 部分被带入地下较大深度的岩石也可以通过底辟作用方式上侵到增生楔体的底部, 造成增生楔逐渐向上拱起及楔体顶部岩石被逐渐剥蚀.

大洋俯冲隧道主要由三部分组成: (1) 下伏俯冲大洋地壳, 由海底沉积物、蚀变玄武岩及其下伏的辉长岩组成; (2) 上覆地幔楔, 即上覆板块之下的地幔橄榄岩; (3) 内部构造混杂岩(Guillot等, 2009; 郑永飞等, 2013, 2015). 在西准噶尔大洋俯冲隧道内部, 主要为来自俯冲洋壳的沉积岩、玄武岩及其上的海山碱性玄

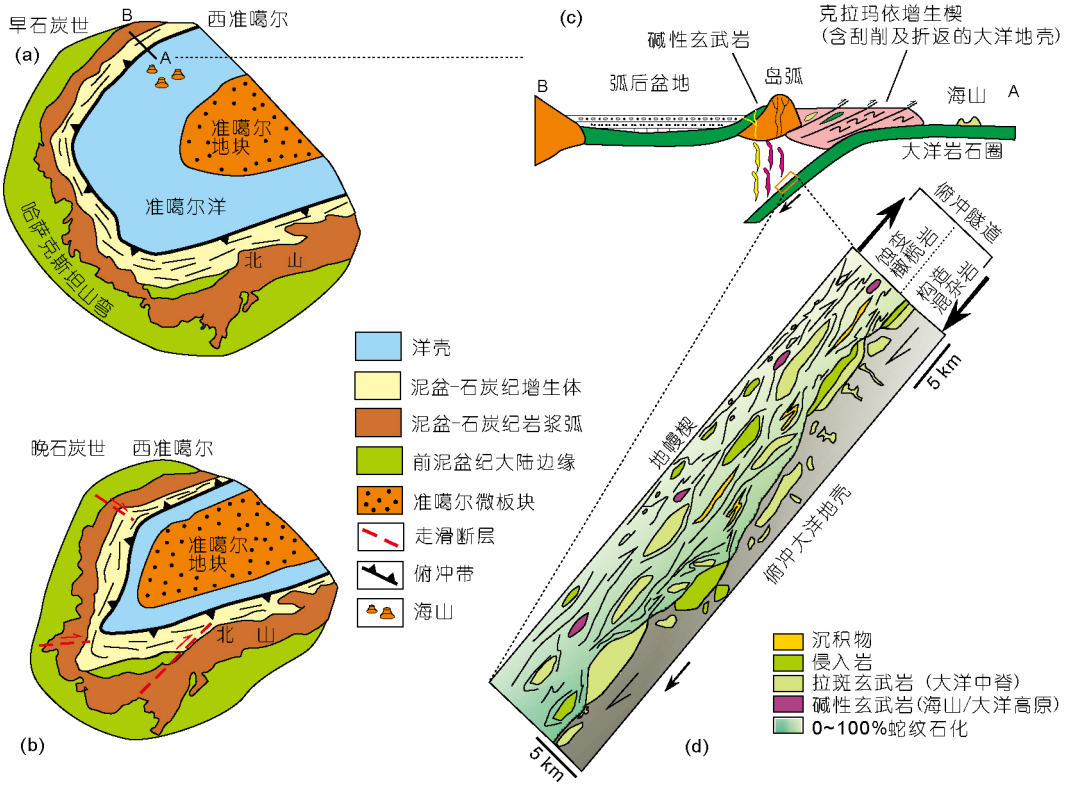

图 5　西准噶尔石炭纪洋内俯冲体系((a), (b))沟弧盆体系(c)及其大洋俯冲隧道过程(d)

(a)和(b)据Choulet等(2016); (c)和(d)据Guillot等(2009)、郑永飞等(2015)、Kerr等(2016)

武岩, 含有少量从地幔楔底部刮削的橄榄岩(图5d). 随着俯冲深度的不断加大, 俯冲隧道内部发生不同程度的变质作用, 可能达到榴辉岩相, 而部分的榴辉岩相变质岩及橄榄岩会折返至地壳浅部, 从而由于温度和压力降低, 榴辉岩相变质岩会退变质为石榴角闪岩及白云石大理岩, 而没有发生变质的地幔橄榄中辉石可能发生出溶结构(朱永峰和徐新, 2007; 陈博等, 2008; 朱永峰等, 2008). 因此野外观察到的石榴角闪岩及白云石大理岩是俯冲到地球深部变质后再折返至增生楔底部与未发生深俯冲的地幔橄榄岩及洋壳碎块一起形成混杂堆积, 即现在出露于地表的达尔布特及克拉玛依蛇绿混杂岩.

克拉玛依增生楔中不仅发育拉斑和钙碱性玄武岩质岩石, 还存在碱性玄武岩. 当然, 蛇绿混杂岩中碱性玄武岩来自于海山(Yang等, 2013, 2015a), 可能与大洋板内地幔柱岩浆事件有关(Safonova和Santosh, 2014). 那泥盆-石炭纪地层中具有OIB特征的碱性玄武岩又是何种成因? 前人对此有不同的认识: (1) 可能来源于深部地幔, 与俯冲板片撕裂形成的板片窗有关(Zhang等, 2011a); (2) 直接来源于大洋板内海山岩浆作用(佟丽莉等, 2014). 事实上, 这些碱性玄武岩可能是大洋俯冲带壳幔相互作用的间接物质记录, 并非来自地幔深部或与大洋板内岩浆事件有关, 因此它们的成因可能涉及大洋俯冲隧道过程的不同阶段和表现形式(郑永飞等, 2015). 具体过程如下: 在西准噶尔洋壳俯冲过程中, 随着深度增加和温度/压力升高, 蚀变玄武岩及其上覆沉积物发生脱水作用而形成含水熔体(郑永飞等, 2016). 在弧下深度(80~130km)脱水形成的流体相对富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素(赵子福等, 2015; 郑永飞等, 2015). 这些流体交代上覆地幔楔形成蚀变橄榄岩, 由该地幔源区部分熔融形成的西准噶尔泥盆-石炭纪地层中夹层火山岩就显示岛弧型的微量元素特征(Peacock, 1993). 当洋壳俯冲达到100~300km时, 变玄武岩和变沉积岩发生显著部分熔融, 其熔体相对富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 而不亏损高场强元素. 这些熔体与上覆地幔楔橄

榄岩发生反应, 就会形成富含辉石或者角闪石的地幔交代岩(Hirschmann等, 2003; Sobolev等, 2005; Pilet等, 2008; Dai等, 2014), 这些地幔交代岩形成之后可能并不是立即发生部分熔融, 而是在地幔楔中储存了一段时间(郑永飞等, 2015). 当地幔楔受到对流加热, 这些地幔交代岩发生部分熔融形成的岩浆, 就具有OIB微量元素特征(Ringwood, 1990; Zheng, 2012; 郑永飞等, 2015), 最终就位于弧前或弧后沉积地层中. 因此克拉玛依增生楔地层中碱性玄武岩可能就源自地幔交代岩(图5c). 郑永飞等(2015)将这个过程概况为SARSH模型, 即包括俯冲、深熔、反应、储存、加热五个阶段. 事实上, 也不能排除俯冲海山碱性玄武岩的效应.

随着研究的深入, 发现克罗诺基半岛的玄武岩地球化学组成为弧火山岩与海山岩石的过渡类型, 显示一个强烈的海山特征信号(Hauri, 1996), 同时在汤加弧北段的塔法西岛火山岩中发现路易维尔脊俯冲的效应(Turner等, 1997; Timm等, 2013). 在哥斯达黎加火山弧后岩浆中存在地幔柱有关的同位素特征, 可能为科科斯脊及其北部海山群俯冲组分加入弧岩浆源区的结果(Harpp等, 2004). 此外, 萨摩亚海底高原通过软流圈物质流对劳海盆北部弧后地区的熔岩地球化学做出的贡献也被识别出来(Regelous等, 2008). 就西准噶尔地区而言, 有研究者认为在晚泥盆世曾有海山发育(Yang等, 2013, 2015a, 2015b, 2015c, 2015d). 因此, 可以推断地层中OIB特征的碱性玄武岩可能是地幔交代岩部分熔融并叠加了海山在大洋俯冲隧道中释放出富集成分的产物(图5d). 值得一提的是, 最新研究发现在西准噶尔萨尔托海蛇绿岩高铝铬铁矿中发育金刚石(Tian等, 2015), 同样在青藏高原的雅鲁藏布江缝合带(Yang等, 2007, 2014)也有金刚石的报道, 而在菲律宾的Zambales蛇绿岩(Yumul Jr等, 2003)及古巴东部的Moa-Mayari蛇绿岩(Zhou等, 2001)中均有豆荚状铬铁矿的报道, 它们的成因可能与俯冲隧道壳幔相互作用有关(Zhou等, 2014).

5 结论

在古生代西准噶尔大洋俯冲过程中, 俯冲板块上部表层一部分岩石被刮削下来, 以构造混杂岩形式呈楔形拼贴于上覆板块边缘, 形成克拉玛依增生楔. 另一部分岩石随俯冲板片进入地幔, 发生不同程度的脱水熔融, 所产生的流体/熔体与地幔橄榄岩反应形成镁铁质-超镁铁质成分的交代岩, 由此部分熔融所形成的玄武岩质岩浆侵位于增生楔中. 另外, 俯冲隧道内部的石榴角闪岩及白云石大理岩在折返过程中, 底垫到增生楔底部, 最终形成在岩石岩相学、构造地质学及地球化学特征等方面都很复杂的西准噶尔克拉玛依增生楔. 大洋俯冲隧道模型在西准噶尔地区的应用, 允许深入剖析了克拉玛依增生楔的形成过程; 作为世界上最大的增生型造山带之一, 中亚造山带它记录了古亚洲洋全部演化过程. 因此, 将大洋俯冲隧道模型应用于整个中亚造山带, 可以详细研究复杂的古大洋俯冲增生过程, 这将为中亚造山带的陆壳增生及造山作用研究提供新的思路.

致谢 感谢主编郑永飞院士及两位评审专家对本文提出的宝贵修改意见.

参考文献

安芳, 朱永峰. 2009. 新疆西准噶尔包古图金矿中的自然砷及其矿床成因意义. 科学通报, 54: 1465–1470

陈博, 朱永峰, 魏少妮, 徐新. 2008. 西准噶尔克拉玛依蛇绿混杂岩中的石榴角闪岩. 岩石学报, 24: 1034–1040

陈宣华, 聂兰仕, 丁伟翠, 王学求, 王志宏, 叶宝莹. 2015. 西准噶尔走滑断裂系元素分布特征及其成矿意义. 岩石学报, 31: 371–387

冯益民. 1985. 西准噶尔优地槽褶皱带沉积建造特征及其多旋回发展. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 10: 29–42

郭召杰, 朱贝, 陈石. 2015. 熔积岩及其对中国几处关键构造事件的限定. 地学前缘, 22: 174–186

何登发, 管树巍, 张年富, 吴晓智, 张越迁. 2006. 准噶尔盆地哈拉阿拉特山冲断带构造及找油意义. 新疆石油地质, 27: 267–298

刘玉琳, 郭丽爽, 宋会侠, 宋彪, 张锐, 许发军, 张云孝. 2009. 新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿年代学研究. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1466–1472

申萍, 周涛发, 袁峰, 潘鸿迪, 王居里, Seitmuratova E. 2015. 环巴尔喀什-西准噶尔成矿省矿床类型、成矿系统和跨境成矿带对接. 岩石学报, 31: 285–303

宋春晖, 王金荣, 黄华芳. 1996. 西准噶尔白碱滩北部太勒古拉组深水沉积研究. 兰州大学学报(自然科学版), 32: 132–137

佟丽莉, 李永军, 田荣, 张洪伟, 王军年, 王冉. 2014. 西准噶尔石炭纪包古图组火山岩岩石地球化学特征及构造意义. 新疆地质, 32: 147–152

新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆区域地质志. 北京: 地质出版社. 442–504

徐芹芹, 季建清, 龚俊峰, 赵磊, 涂继耀, 孙东霞, 陶涛, 朱自虎, 何国琦, 侯建军. 2009. 新疆西准噶尔晚古生代以来构造样式与变形

序列研究. 岩石学报, 25: 636–644
杨高学, 李永军, 佟丽莉, 杨宝凯, 张胜龙, 沈锐, 段丰浩. 2015. 西准噶尔蛇绿混杂岩中洋岛玄武岩研究新进展. 地质学报, 89: 392–405
杨庚, 王晓波, 李本亮, 石昕. 2011. 准噶尔西北缘斜向挤压构造与走滑断裂. 地质科学, 46: 696–708
张继恩, 肖文交, 韩春明, 毛启贵, 敖松坚, 郭谦谦. 2009. 西准噶尔野鸭沟地区褶皱冲断构造的特征及意义. 地质通报, 28: 1894–1903
赵子福, 戴立群, 郑永飞. 2015. 大陆俯冲带两类壳幔相互作用. 中国科学: 地球科学, 45: 900–915
郑永飞, 赵子福, 陈伊翔. 2013. 大陆俯冲隧道过程: 大陆碰撞过程中的板块界面相互作用. 科学通报, 58: 2233–2239
郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 赵子福. 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带. 中国科学: 地球科学, 45: 711–735
郑永飞, 陈仁旭, 徐峥, 张少兵. 2016. 俯冲带中的水迁移. 中国科学: 地球科学, 46: 253–286
周建波, 郑永飞, 李龙, 谢智. 2001. 扬子大陆板块俯冲的构造加积楔. 地质学报, 75: 338–352
周涛发, 袁峰, 范裕, 谭绿贵, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区A型花岗岩的地球动力学意义: 来自岩石地球化学和锆石SHRIMP定年的证据. 中国科学D辑: 地球科学, 36: 39–48
朱永峰. 2014. 中亚成矿域核心区地质演化和巨型成矿带划分. 矿床地质, 33: 471–485
朱永峰, 徐新. 2007. 西准噶尔白碱滩二辉橄榄岩中两种辉石的出溶结构及其地质意义. 岩石学报, 23: 1075–1086
朱永峰, 徐新, 陈博, 薛云兴. 2008. 西准噶尔蛇绿混杂岩中的白云母大理岩和石榴角闪岩: 早古生代残余洋壳深俯冲的证据. 岩石学报, 24: 2676–2777
纵瑞文, 王仔章, 龚一鸣, 王国灿, 肖龙, 王志宏, 范若颖. 2014. 西准噶尔伊尼萨拉蛇绿混杂岩中奥陶纪放射虫的发现及意义. 中国科学: 地球科学, 44: 2238–2246
Beaumont C, Ellis S, Pfiffner A. 1999. Dynamics of sediment subduction-accretion at convergent margins: Short-term modes, long-term deformation, and tectonic implications. J Geophys Res, 104: 17573–17601
Brown D, Spadea P. 1999. Processes of forearc and accretionary complex formation during arc-continent collision in the southern Ural Mountains. Geology, 27: 649–652
Buckman S, Aitchison J C. 2004. Tectonic evolution of Paleozoic terranes in West Junggar, Xinjiang, NW China. In: Malpas J, Fletcher C J, Aitchison J C, eds. Aspects of the Tectonic Evolution of China. Geol Soc London Spec Publ, 226: 101–129
Chen B, Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth. Geochim Cosmochim Acta, 69: 1307–1320
Chen B, Jahn B. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. J Asian Earth Sci, 23: 691–703
Chen J F, Han B F, Ji J Q, Zhang L, Xu Z, He G Q, Wang T. 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China. Lithos, 115: 137–152
Chen S, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z. 2014. Ophiolitic mélanges in crustal-scale fault zones: Implications for the Late Palaeozoic tectonic evolution in West Junggar, China. Tectonics, 33: 2419–2443
Choulet F, Faure M, Cluzel D, Chen Y, Lin W, Wang B. 2012. From oblique accretion to transpression in the evolution of the Altaid collage: New insights from West Junggar, northwestern China. Gondwana Res, 21: 530–547
Choulet F, Faure M, Cluzel D, Chen Y, Lin W, Wang B, Xu B. 2016. Toward a unified model of Altaids geodynamics: Insight from the Palaeozoic polycyclic evolution of West Junggar (NW China). Sci China Earth Sci, 59: 25–57
Cloos M, Shreve R L. 1988a. Subduction-channel model of prism accretion, melange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins: 1. Background and description. Pure Appl Geophys, 128: 455–500
Cloos M, Shreve R L. 1988b. Subduction-channel model of prism accretion, melange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins: 2. Implications and discussion. Pure Appl Geophys, 128: 501–545
Dahlen F A. 1990. Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. Annu Rev Earth Planet Sci, 18: 55–99
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
Davis D, Suppe J, Dahlen F A. 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. J Geophys Res, 88: 1153–1172
Dewey J. 2003. Ophiolites and lost oceans, rifts, ridges, arcs, and/or scrapings? In: Dilek Y, Newcomb S, eds. Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. Boulder: Geological Society America. 153–158
Feng Y, Coleman R G, Tilton G, Xiao X. 1989. Tectonic evolution of the West Junggar Region, Xinjiang, China. Tectonics, 8: 729–752
Geng H Y, Sun M, Yuan C, Xiao W J, Xian W S, Zhao G C, Zhang L F, Wong K, Wu F Y. 2009. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? Chem Geol, 266: 364–389
Geng H Y, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J. 2011. Geochemical and geochronological study of early Carboniferous volcanic rocks from the West Junggar: Petrogenesis and tectonic implications. J Asian Earth Sci, 42: 854–866

Gerya T V, Stöckhert B, Perchuk A L. 2002. Exhumation of high-pressure metamorphic rocks in a subduction channel: A numerical simulation. Tectonics, 21: 6-1–6-19

Guillot S, Hattori K, Agard P, Schwartz S, Vidal O. 2009. Exhumation processes in oceanic and continental subduction contexts: A review. In: Lallemand S, Funiciello F, eds. Subduction Zone Geodynamics. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 175–205

Harpp K S, Wanless V D, Otto R H, Hoernle K, Werner R. 2004. The Cocos and Carnegie Aseismic Ridges: A trace element record of long-term plume-spreading center interaction. J Petrol, 46: 109–133

Hauri E H. 1996. Major-element variability in the Hawaiian mantle plume. Nature, 382: 415–419

Hirschmann M M, Kogiso T, Baker M B, Stolper E M. 2003. Alkalic magmas generated by partial melting of garnet pyroxenite. Geology, 31: 481–484

Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can J Earth Sci, 8: 523–548

Isozaki Y. 1997. Jurassic accretion tectonics of Japan. Isl Arc, 6: 25–51

Jahn B M. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. In: Malpas J, Fletcher C J, Aitchison J C, eds. Aspects of the Tectonic Evolution of China. Geol Soc London Spec Publ, 226: 73–100

Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. Trans R Soc Edinb-Earth Sci, 91: 181–193

Jian P, Liu D Y, Kröner A, Windley B F, Shi Y, Zhang F, Shi G, Miao L, Zhang W, Zhang Q, Zhang L, Ren J. 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth. Lithos, 101: 233–259

Kerr A C, Lavis O, Kakar M I, McDonald I. 2016. Petrogenesis and tectonomagmatic significance of Eocene mafic intrusions from the Neotethyan suture zone in the Muslim Bagh-Khanozai region, Pakistan. J Geol Soc, 173: 518–530

Kröner A, Kovach V, Belousova E, Hegner E, Armstrong R, Dolgopolova A, Seltmann R, Alexeiev D V, Hoffmann J E, Wong J, Sun M, Cai K, Wang T, Tong Y, Wilde S A, Degtyarev K E, Rytsk E. 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Res, 25: 103–125

Li D, He D F, Qi X F, Zhang N N. 2015. How was the Carboniferous Balkhash-West Junggar remnant ocean filled and closed? Insights from the Well Tacan-1 strata in the Tacheng Basin, NW China. Gondwana Res, 27: 342–362

Li Z H, Liu M Q, Gerya T. 2015. Material transportation and fluid-melt activity in the subduction channel: Numerical modeling. Sci China Earth Sci, 58: 1251–1268

Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-1bZr-1bY diagram. Chem Geol, 56: 207–218

Moore J C, Silver E A. 1987. Continental margin tectonics: Submarine accretionary prisms. Rev Geophys, 25: 1305–1312

O'Neill C, Müller D, Steinberger B. 2003. Geodynamic implications of moving Indian Ocean hotspots. Earth Planet Sci Lett, 215: 151–168

Osozawa S. 1994. Plate reconstruction based upon age data of Japanese accretionary complexes. Geology, 22: 1135–1138

Peacock S M. 1993. The importance of blueschist→eclogite dehydration reactions in subducting oceanic crust. Geol Soc Am Bull, 105: 684–694

Pilet S, Baker M B, Stolper E M. 2008. Metasomatized lithosphere and the origin of alkaline lavas. Science, 320: 916–919

Regelous M, Turner S, Falloon T J, Taylor P, Gamble J, Green T. 2008. Mantle dynamics and mantle melting beneath Niuafo'ou Island and the northern Lau back-arc basin. Contrib Mineral Petrol, 156: 103–118

Ren R, Han B F, Xu Z, Zhou Y Z, Liu B, Zhang L, Chen J F, Su L, Li J, Li X H, Li Q L. 2014. When did the subduction first initiate in the southern Paleo-Asian Ocean: New constraints from a Cambrian intra-oceanic arc system in West Junggar, NW China. Earth Planet Sci Lett, 388: 222–236

Ringwood A E. 1990. Slab-mantle interactions. Chem Geol, 82: 187–207

Safonova I Y, Santosh M. 2014. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. Gondwana Res, 25: 126–158

Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364: 299–307

Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V, Nikogosian I K. 2005. An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts. Nature, 434: 590–597

Stern R J, Bloomer S H. 1992. Subduction zone infancy: Examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California arcs. Geol Soc Am Bull, 104: 1621–1636

Stern R J. 2002. Subduction zones. Rev Geophys, 40: 1012

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Sauders A D and Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geol Soc London Spec Publ, 42: 313–345

Tarduno J A, Duncan R A, Scholl D W, Cottrell R D, Steinberger B, Thordarson T, Kerr B C, Neal C R, Frey F A, Torii M, Carvallo C. 2003. The emperor seamounts: Southward motion of the Hawaiian

hotspot plume in Earth's mantle. Science, 301: 1064–1069

Tang G J, Wang Q, Wyman D A, Li Z X, Zhao Z H, Jia X H, Jiang Z Q. 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China). Chem Geol, 277: 281–300

Tang G J, Wyman D A, Wang Q, Li J, Li Z X, Zhao Z H, Sun W D. 2012. Asthenosphere-lithosphere interaction triggered by a slab window during ridge subduction: Trace element and Sr-Nd-Hf-Os isotopic evidence from Late Carboniferous tholeiites in the western Junggar area (NW China). Earth Planet Sci Lett, 329-330: 84–96

Tian Y Z, Yang J S, Robinson P T, Xiong F H, Li Y, Zhang Z M, Liu Z, Liu F, Niu X L. 2015. Diamond discovered in high-Al chromitites of the Sartohay ophiolite, Xinjiang Province, China. Acta Geol Sin, 89: 332–340

Timm C, Bassett D, Graham I J, Leybourne M I, de Ronde C E J, Woodhead J, Layton-Matthews D, Watts A B. 2013. Louisville seamount subduction and its implication on mantle flow beneath the central Tonga-Kermadec arc. Nat Commun, 4: 1720–1728

Turner S, Hawkesworth C, Rogers N, Bartlett J, Worthington T, Hergt J, Pearce J, Smith I. 1997. ^{238}U-^{230}Th disequilibria, magma petrogenesis, and flux rates beneath the depleted Tonga-Kermadec island arc. Geochim Cosmochim Acta, 61: 4855–4884

Wang Z H, Sun S, Li J L, Hou Q L, Qin K Z, Xiao W J, Hao J. 2003. Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang, China: Geochemical and geochronological constraints from the ophiolites. Tectonics, 22: 1014

Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M. 2012. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review. Earth-Sci Rev, 113: 303–341

Wilson T J, Hanson R E, Grunow A M. 1989. Multistage melange formation within an accretionary complex, Diego Ramirez Islands, southern Chile. Geology, 17: 11–14

Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chem Geol, 20: 325–343

Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, Kroner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. J Geol Soc, 164: 31–47

Wong K, Sun M, Zhao G C, Yuan C, Xiao W J. 2010. Geochemical and geochronological studies of the Alegedayi Ophiolitic Complex and its implication for the evolution of the Chinese Altai. Gondwana Res, 18: 438–454

Xiao W J, Han C M, Yuan C, Sun M, Lin S F, Chen H L, Li Z L, Li J L, Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. J Asian Earth Sci, 32: 102–117

Xiao W J, Windley B F, Huang B C, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Sun S, Li J L. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. Int J Earth Sci, 98: 1189–1217

Xiao W J, Huang B C, Han C M, Sun S, Li J L. 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. Gondwana Res, 18: 253–273

Yakubchuk A S, Shatov V V, Kirwin D, Edwards A, Tomurtogoo O, Badarch G, Buryak V A. 2005. Gold and base metal metallogeny of the Central Asian orogenic supercollage. In: 100th Anniv Vol of Econ Geol. 1069–1096

Yang G X, Li Y J, Gu P Y, Yang B K, Tong L L, Zhang H G. 2012a. Geochronological and geochemical study of the Darbut Ophiolitic Complex in the West Junggar (NW China): Implications for petrogenesis and tectonic evolution. Gondwana Res, 21: 1037–1049

Yang G X, Li Y J, Santosh M, Gu P Y, Yang B, Zhang B, Wang H B, Zhong X, Tong L L. 2012b. A Neoproterozoic seamount in the Paleo-Asian Ocean: Evidence from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mayile ophiolitic mélange in West Junggar, NW China. Lithos, 140-141: 53–65

Yang G X, Li Y J, Santosh M, Yang B K, Yan J, Zhang B, Tong L L. 2012c. Geochronology and geochemistry of basaltic rocks from the Sartuohai ophiolitic mélange, NW China: Implications for a Devonian mantle plume within the Junggar Ocean. J Asian Earth Sci, 59: 141–155

Yang G X, Li Y J, Santosh M, Yang B K, Zhang B, Tong L L. 2013. Geochronology and geochemistry of basalts from the Karamay ophiolitic melange in West Junggar (NW China): Implications for Devonian-Carboniferous intra-oceanic accretionary tectonics of the southern Altaids. Geol Soc Am Bull, 125: 401–419

Yang G X, Li Y J, Xiao W J, Tong L L. 2015a. OIB-type rocks within West Junggar ophiolitic mélanges: Evidence for the accretion of seamounts. Earth-Sci Rev, 150: 477–496

Yang G X, Li Y J, Santosh M, Xiao W J, Yang B K, Tong L L, Zhang S L. 2015b. Alkaline basalts in the Karamay ophiolitic mélange, NW China: A geological, geochemical and geochronological study and implications for geodynamic setting. J Asian Earth Sci, 113: 110–125

Yang G X, Li Y J, Tong L L, Li G Y, Shen R, Chen W D. 2015c. Oceanic island basalts within the West Junggar ophiolitic mélanges: Petrogenetic and tectonic implications. Acta Geol Sin, 89: 306–306

Yang G X, Li Y J, Tong L L, Li G Y, Shen R, Wu L. 2015d. Accration and subduction of seamounts in West Junggar. Acta Geol Sin, 89: 1417–1417

Yang G X, Li Y J, Tong L, Li G Y, Wu L, Wang Z P. 2016. Petrogene-

sis and tectonic implications of early Carboniferous alkaline volcanic rocks in Karamay region of West Junggar, Northwest China. Int Geol Rev, 58: 1278–1293

Yang J S, Dobrzhinetskaya L F, Bai W J, Fang Q S, Robinson P T, Zhang J F, Green II H W. 2007. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. Geology, 35: 875–878

Yang J S, Robinson P T, Dilek Y. 2014. Diamonds in ophiolites. Elements, 10: 127–130

Yin J Y, Yuan C, Sun M, Long X P, Zhao G C, Wong K P, Geng H Y, Cai K D. 2010. Late Carboniferous high-Mg dioritic dikes in Western Junggar, NW China: Geochemical features, petrogenesis and tectonic implications. Gondwana Res, 17: 145–152

Yumul Jr G, Dimalanta C B, Maglambayan V B, Tamayo Jr R A. 2003. Mineralization controls in island arc settings: Insights from Philippine metallic deposits. Gondwana Res, 6: 767–776

Zhang C, Zhai M G, Allen M B, Saunders A D, Wang G R, Huang X. 1993. Implications of Palaeozoic ophiolites from Western Junggar, NW China, for the tectonics of central Asia. J Geol Soc, 150: 551–561

Zhang C L, Li Z X, Li X H, Xu Y G, Zhou G, Ye H M. 2010. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275 Ma mantle plume? Geol Soc Am Bull, 122: 2020–2040

Zhang J E, Xiao W J, Han C M, Mao Q G, Ao S J, Guo Q Q, Ma C. 2011a. A Devonian to Carboniferous intra-oceanic subduction system in Western Junggar, NW China. Lithos, 125: 592–606

Zhang J E, Xiao W J, Han C M, Ao S J, Yuan C, Sun M, Geng H Y, Zhao G C, Guo Q Q, Ma C. 2011b. Kinematics and age constraints of deformation in a Late Carboniferous accretionary complex in Western Junggar, NW China. Gondwana Res, 19: 958–974

Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, Xie Z. 2005. Low-Grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt: A passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. Int Geol Rev, 47: 851–871

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

Zhou M F, Lewis J, Malpas J, Munoz-Gomez N. 2001. The Mayari-Baracoa paired ophiolite belt, Eastern Cuba: Implications for tectonic settings and platinum-group elemental mineralization. Int Geol Rev, 43: 494–507

Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y, Gao J F, Wang W, Yang S H. 2009. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province. Lithos, 113: 583–594

Zhou M F, Robinson P T, Su B X, Gao J F, Li J W, Yang J S, Malpas J. 2014. Compositions of chromite, associated minerals, and parental magmas of podiform chromite deposits: The role of slab contamination of asthenospheric melts in suprasubduction zone environments. Gondwana Res, 26: 262–283

Zhu Y F, Chen B, Qiu T. 2015. Geology and geochemistry of the Baijiantan-Baikouquan ophiolitic mélanges: Implications for geological evolution of west Junggar, Xinjiang, NW China. Geol Mag, 152: 41–69