

doi:10.3799/dqkx.2015.079

西准噶尔阿克巴斯陶岩体三维形态及其地质意义

张攀¹, 王国灿^{1,2*}, 肖龙¹, 张胜业³, 周佩¹, 张云¹, 沈青强¹

1. 中国地质大学全球大地构造研究中心, 地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 西准噶尔地区广泛发育晚石炭世—二叠纪不同规模、形态各异的花岗岩体, 阿克巴斯陶岩体是其中最具代表性岩体之一, 但对于该岩体三维形态和侵位过程的研究尤显薄弱。基于详细的野外路线地质调查, 通过对阿克巴斯陶岩体 NE、NW、SE 和 SW 侧接触边界产状、接触热变质带宽度、岩脉方位和发育程度、顶垂体和围岩捕虏体发育特征的研究, 揭示出岩体 NE、SE 和 SW 侧与围岩呈低角度外倾接触, 而岩体 NW 侧与围岩呈高角度接触。在此基础上, 结合岩体出露区音频大地电磁反演结果, 揭示出阿克巴斯陶岩体三维形态总体为不对称蘑菇状, 岩体侵位时岩浆主要由 NW 向朝 SE 向斜向侵位, 并建立了岩体的三维形态模型。阿克巴斯陶岩体三维形态的确定, 揭示了西准噶尔地区晚石炭世晚期—早二叠世为后造山伸展环境。

关键词: 阿克巴斯陶岩体; 三维形态; 地球化学; 构造。

中图分类号: P545

文章编号: 1000-2383(2015)06-0941-12

收稿日期: 2014-08-22

Three-Dimensional Configuration Analysis and Its Geological Significance of Akebasitao Pluton in West Junggar

Zhang Pan¹, Wang Guocan^{1,2*}, Xiao Long¹, Zhang Shengye³, Zhou Pei¹, Zhang Yun¹, Shen Qingqiang¹

1. Center for Global Tectonics, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Late Carboniferous-Early Permian post-collision plutons are extensively distributed throughout the West Junggar, Xinjiang, China, of which the Akebasitao pluton is the most distinguished one. However, investigations on the three-dimensional configuration and emplacement mechanism of the pluton remain relatively insufficient. A multidisciplinary approach, including field structure and audio magnetotelluric sounding, has been adopted for study on the Akebasitao pluton. The geological features and the audio magnetotelluric sounding exploration suggest that the pluton, with an asymmetrical mushroom-shape and slightly oblique movement of magma from NW to SE, formed in the post-orogenic extensional environment. What is more, the three-dimensional configuration of the pluton reveals that the West Junggar was of post-orogenic extensional environment in the Late Carboniferous to Early Permian. This study has important implication for three-dimensional shape of those post-collision plutons that are widely developed in West Junggar.

Key words: akebasitao pluton; three-dimensional configuration; geochemistry; tectonics.

花岗岩的形成和侵位是区域构造演化的重要组成部分。20 世纪 70 年代以来, 花岗岩岩体构造的研究取得了很大的进展, 为花岗岩岩浆的生成、运移侵位以及构造变形等一系列问题的解决提供了新的思路 and 有效的方法, 已成为花岗岩地质研究中发展比较快的分支 (Castro, 1987; Hutton *et al.*, 1990;

基金项目: 中国地质调查局项目 (No. 12120111220245); 新疆 1: 25 万铁厂沟镇幅、克拉玛依市幅区调修测 (No. 1212011120502)。

作者简介: 张攀 (1992—), 男, 硕士研究生, 构造地质学方向。E-mail: 13006152622@163.com

* **通讯作者:** 王国灿, E-mail: wgcan@cug.edu.cn

引用格式: 张攀, 王国灿, 肖龙, 等, 2015. 西准噶尔阿克巴斯陶岩体三维形态及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 40(6): 941—952.

Paterson and Vernon, 1995). 岩体的侵位包括岩浆上升、定位和占据空间的全部岩浆动力过程,有关岩体的侵位机制提出的观点很多,主要有底辟作用、气球膨胀作用、剪切拉张及岩墙扩展作用和顶蚀作用等. 不同的侵位机制常形成特有的岩体形态,如底辟作用侵位的岩体常呈倒水滴状,而气球膨胀作用下侵位的岩体一般表现为蘑菇状. 但除了侵位时岩浆自身的动力学特点外,侵位时区域构造背景同样影响了岩体的三维形态,如在伸展背景下侵位的岩体

常呈圆形,并截断区域构造线方向,而在造山作用中形成的岩体往往呈带状分布,长轴走向一般与造山带延伸方向一致.

西准噶尔地区广泛发育晚石炭世—二叠纪花岗岩,成分主要呈现碱性花岗岩特点,形态多呈不规则的等轴状(图 1b). 目前对这些碱性花岗岩主要局限于岩相学及岩石地球化学的研究,而对其侵位机制及岩体的三维形态等问题论述不多. 杨富贵等(1998)认为庙尔沟岩体、阿克巴斯陶岩体是在地壳

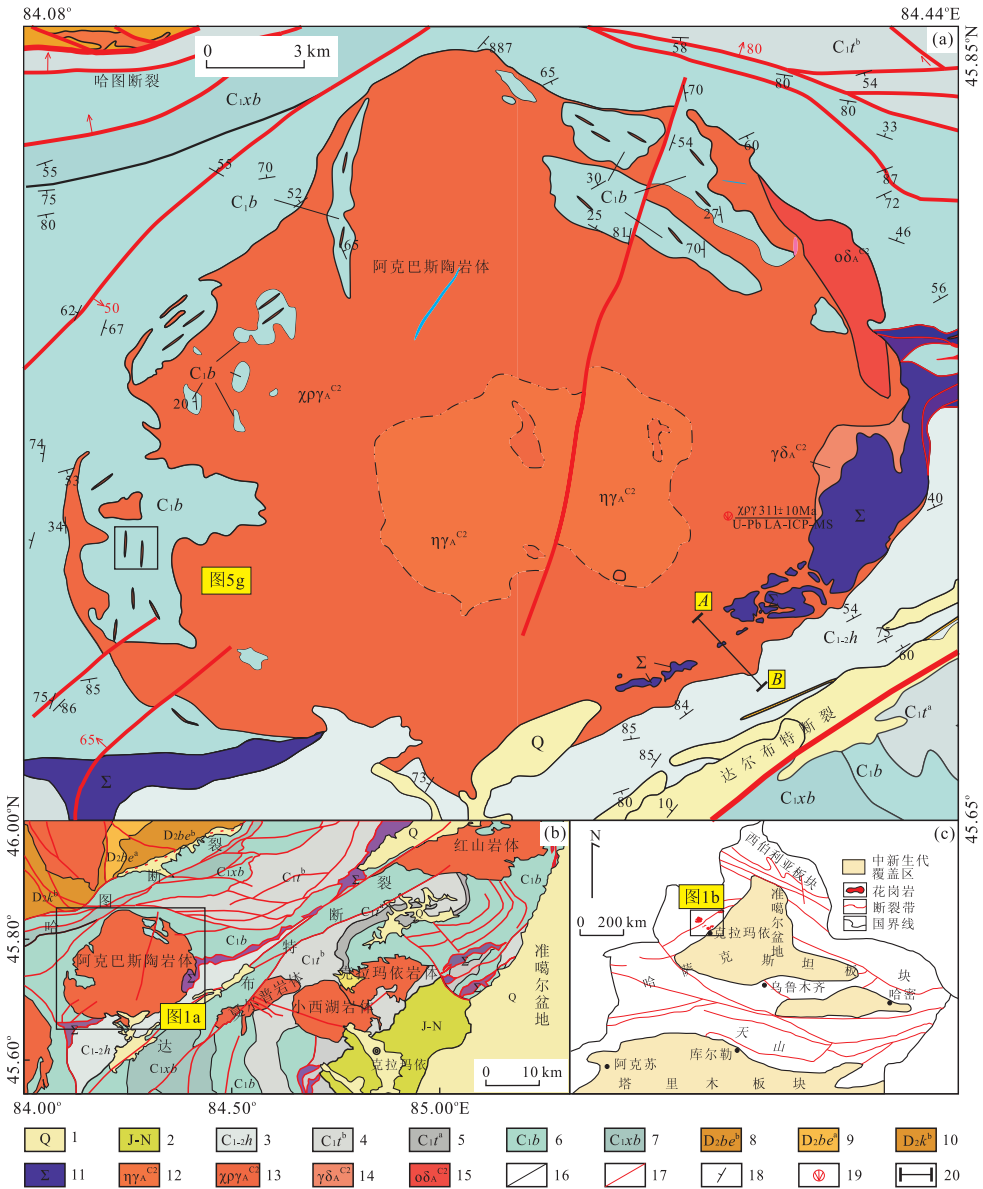


图 1 研究区地质图

Fig. 1 Geoglogical map of study area

a. 阿克巴斯陶岩体地质简图; b. 研究区地质简图; c. 研究区大地构造位置简图(据 Yang *et al.*, 2012 改绘). 1. 第四系; 2. 中生界地层; 3. 上石炭统哈拉阿拉特山组; 4. 下石炭统太勒古拉组上段; 5. 下石炭统太勒古拉组下段; 6. 下石炭统包古图组; 7. 下石炭统希贝库拉斯组; 8. 中泥盆统巴尔雷克组上段; 9. 中泥盆统巴尔雷克组下段; 10. 中泥盆统库鲁木迪组下段; 11. 超基性岩; 12. 二长花岗岩; 13. 碱长花岗岩; 14. 花岗闪长岩; 15. 石英闪长岩; 16. 地质界线; 17. 断层; 18. 地层产状(°); 19. 年龄样采样点; 20. 剖面位置

浅部以气球膨胀作用定位于与区域上 NNE 向深大断裂有关的次级张性裂隙发育部位形成,但未给出岩体的三维形态,岩体的空间分布与 NE 向断裂并不存在空间上关联.关于岩体形成的构造环境前人认为存在与俯冲有关的岛弧环境(Feng *et al.*, 1989;肖文交等,2006)、洋脊俯冲环境(Geng *et al.*, 2009;Ma *et al.*, 2012;尹继元等,2012)和后碰撞伸展环境(Wang *et al.*, 2003;韩宝福等,2006;苏玉平等,2006;高睿等,2013).通常情况下与俯冲有关的侵入岩常呈条带状或局限于某一区域分布,岩体形态多样,没有固定的形式;而后碰撞伸展环境下岩体常呈面状弥散分布,平面形态多呈椭圆形或不规则椭圆形.本文依托“西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质调查”项目,基于详细的路线地质调查资料,在分析了阿克巴斯陶岩体野外侵位地质特征基础上,结合地球化学、地球物理学相关数据,重点讨论该岩体的空间三维形态,确定其侵位机制及其形成的构造环境.

1 区域地质概况

西准噶尔位于西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块 3 个大陆板块的交接处(图 1c),是中亚造山带的重要组成部分(Yang *et al.*, 2012).前人将古生代的构造演化大致分为 3 个阶段:古生代为陆缘增生阶段,古生代晚期的晚石炭世发生陆块碰撞洋盆消失,晚石炭世晚期—二叠纪为后碰撞伸展阶段(Feng *et al.*, 1989;李理等,2015;晏文博等,2015).研究区晚古生代地层广泛发育,哈图断裂西北一带发育有中泥盆统库鲁木迪组(D_2k)和巴尔雷克组(D_2be),主要表现为一套岛弧火山—碎屑岩建造(龚一鸣和纵瑞文,2015).哈图断裂以南石炭系地层出露广泛,主要为一套斜坡相碎屑沉积岩系夹火山—碎屑沉积,地层序列从下到上依次划分为:希贝库拉斯组(C_1xb),由一套巨厚层浊积岩组成,主要岩性为凝灰质粗砂岩,凝灰质含砾中粗砂岩夹沉凝灰岩;包古图组(C_1b),由一套中薄层状的细粒火山碎屑岩组成,主要岩性为灰—深灰色薄—中层状凝灰质粉砂岩、凝灰质泥岩及粉—细砂状晶屑沉凝灰岩;太勒古拉组(C_1tb),主要为—套灰—深灰、灰绿色凝灰质粉砂岩、粉—细粒晶屑沉凝灰岩、岩屑晶屑沉凝灰岩、晶屑玻屑沉凝灰岩组合;哈拉阿拉特山组($C_{1-2}h$),主要由灰绿色砂岩、砂砾岩、粉砂质泥岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质砂岩组成.前 3 者主要为

低成熟度的深海到半深海斜坡相陆缘碎屑复理石沉积,后者为半深海浊流相过渡到浅海相的海槽沉积,总体属于洋盆闭合前夕的残留洋盆的填满(龚一鸣和纵瑞文,2015).

研究区发育大量花岗岩体,侵位于石炭系地层中,代表性岩体有庙尔沟岩体、阿克巴斯陶岩体、克拉玛依岩体、小西湖岩体、红山岩体.这些岩体侵入年龄约为 300 Ma,属晚石炭世—早二叠世(苏玉平等,2006).岩石地球化学特征指示该时段的花岗岩具有铝质 A 型花岗岩的特点(苏玉平等,2006;庞振甲等,2010).

研究区内主要发育有 NE-NNE 向断裂,NE 向的达尔布特断裂是该区域内一条重要的规模最大的断裂,其次为研究区北西侧的 NE 向哈图断裂.研究区内还发育有 2 条晚古生代蛇绿混杂岩带,分别为达尔布特蛇绿混杂岩和克拉玛依蛇绿混杂岩,据前人研究前者形成于中志留世—中泥盆世(张弛和黄萱,1992;辜平阳等,2009;陈石和郭召杰,2010;陈博和朱永峰,2011),而后者形成的时代跨度较大,分别为早寒武世(朱永峰等,2007)、奥陶纪(何国琦等,2007)和晚泥盆世(纵瑞文等,2014).

阿克巴斯陶岩体位于达尔布特断裂西北,侵位于早石炭世包古图组(C_1b)和早—晚石炭世哈拉阿拉特山组($C_{1-2}h$)中.在野外主要鉴别出碱长花岗岩和二长花岗岩 2 种岩石类型,在粗粒碱长花岗岩中获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 311 ± 10 Ma,时代为晚石炭世晚期(本项目,待发表).

2 阿巴克斯陶岩体基本特征

2.1 岩体地质特征

阿克巴斯陶岩体位于达尔布特断裂北西侧,平面展布呈近圆状,略向 NE—SW 方向延展,整体出露面积约 375 km^2 (图 1a).阿克巴斯陶岩体主要由碱长花岗岩和二长花岗岩 2 种岩石类型组成,二者为脉动接触关系.碱长花岗岩出露面积最大,约占研究区岩体总面积的 77%,呈环状分布于阿克巴斯陶—阿依纳巴斯陶阔纳斯一带.二长花岗岩位于岩体中心恩吉勒盆克提一带,出露面积约占研究区花岗岩总面积的 18.5%,二长花岗岩内多处可见未剥蚀的碱长花岗岩覆盖在二长花岗岩之上(图 2a),边界处可见二长花岗岩切割碱长花岗岩原生节理的现象(图 2b),这揭示出碱长花岗岩早于二长花岗岩.阿克巴斯陶岩体中各岩石单元定向组构均不发育,

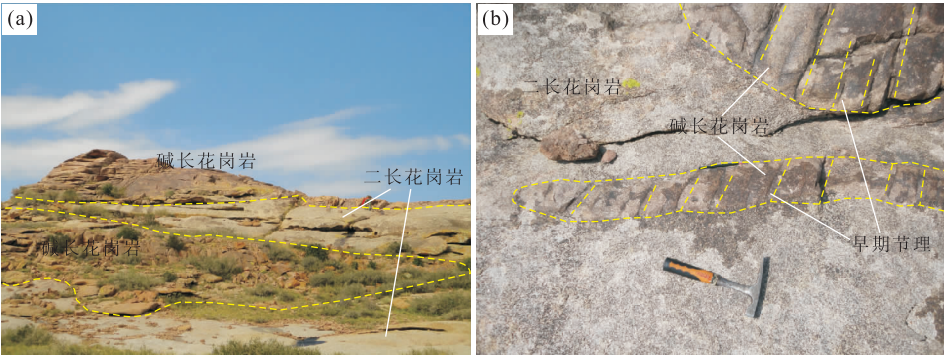


图 2 二长花岗岩和碱长花岗岩野外地质特征

Fig. 1 Geological characteristics of alkali-feldspar granite and monzonitic granite

a. 碱长花岗岩与二长花岗岩宏观界线; b. 后期脉动侵入的二长花岗岩切割碱长花岗岩中的早期节理

岩浆的原生面理和线理构造难以观测。

阿克巴斯陶岩体围岩为早石炭世包古图组 (C_1b)、哈拉阿拉特山组 ($C_{1-2}h$) 以及小面积的蛇绿混杂岩。包古图组和哈拉阿拉特山组主要岩性为凝灰质粉砂岩和粉砂岩, 在与岩体接触带附近发育有 0.5~1.5 km 不等的角岩化带。此外, 岩体边部出露有大面积的围岩顶垂体, 顶垂体均发生了接触热变质作用(图 1a)。岩体 SE 侧断续出露了小面积的超基性岩顶垂体(图 1a), 是达尔布特蛇绿混杂岩带的延伸, 其呈无根状盖在岩体之上, 为花岗岩侵位到蛇绿岩带中, 后期剥蚀导致后者以顶垂体形式分布。总之, 阿克巴斯陶岩体围岩或顶垂体均发育了一定程度的接触热变质作用, 但变形程度很低, 定向组构不发育。

2.2 年代学及岩石地球化学特征

本项目组在粗粒碱长花岗岩中获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 311 ± 10 Ma, 时代为晚石炭世晚期, 与苏玉平等(2006)获得的锆石 U-Pb 年龄 303 ± 3 Ma 和庞振甲等(2010)获得的锆石 U-Pb 年龄 296 Ma 相近, 该年龄可代表阿克巴斯陶碱长花岗岩体形成的年龄。

笔者及前人岩石地球化学研究表明阿克巴斯陶岩体具有高硅、相对富铝、偏碱性、弱过铝质的特征, 富集 Rb、K、Th 等大离子亲石元素及 Zr、Hf 等高场强元素, 稀土元素分配模式呈典型的右倾“V”字型, 属典型的铝质 A 型花岗岩(苏玉平等, 2006; 庞振甲等, 2010)。构造环境图解显示阿克巴斯陶岩体形成于后碰撞伸展环境中(苏玉平等, 2006; 庞振甲等, 2010)。

3 岩体三维形态分析

花岗岩的侵位过程和岩体形成时的构造背景决定了岩体的三维形态, 岩体后期的剥蚀程度决定了花岗岩的地表形态和出露特征, 这一特性为笔者推测岩体三维形态给出了最直观的地质依据。本次研究主要通过对岩体 NE、SW、SE 和 NW 侧接触边界产状、接触热变质带宽度、岩脉方位和发育程度、顶垂体和围岩捕虏体发育特征的研究, 分别揭示岩体在 4 个方位的边界形态, 并结合岩体三维电性特征, 建立岩体的三维空间形态模型。

3.1 岩体 NE 侧形态分析

岩体 NE 侧出露有大面积的围岩顶垂体(图 1a), 顶垂体均发生强烈的角岩化, 原岩为凝灰质粉砂岩; 顶垂体内岩层层理产状倾角小, 倾向无规律。顶垂体与岩体的接触界面低缓且倾向围岩(图 3a), 多处可见顶垂体呈薄层状的岩片盖在岩体之上(图 3b)。顶垂体中发育多条碱长花岗岩脉, 有高角度和低角度 2 种类型。高角度岩脉均切割顶垂体原始层理, 低角度岩脉(或岩席)大致呈顺层产状(图 3c、3d)。通过对岩脉接触面产状下半球极射赤平投影显示, 高角度侵入的岩脉走向大致平行于该侧岩体和围岩的界线, 低角度侵入的岩脉走向无规律(图 4a)。岩体外围围岩中接触热变质带发育, 变质程度从接触边界向外逐渐减弱, 肉眼可识别的接触热变质带平均宽度约为 1.5 km。

该侧岩体边部发育大量的围岩捕虏体。捕虏体总体无定向, 基本呈棱角状薄片贴在岩体之上, 边部可见被撕裂扯开的现象(图 3e、3f)。捕虏体与岩体接触面产状倾角低缓, 大多数倾向围岩。对代表性捕虏体形态分析(图 3g), 揭示出野外观察到的捕虏体扁

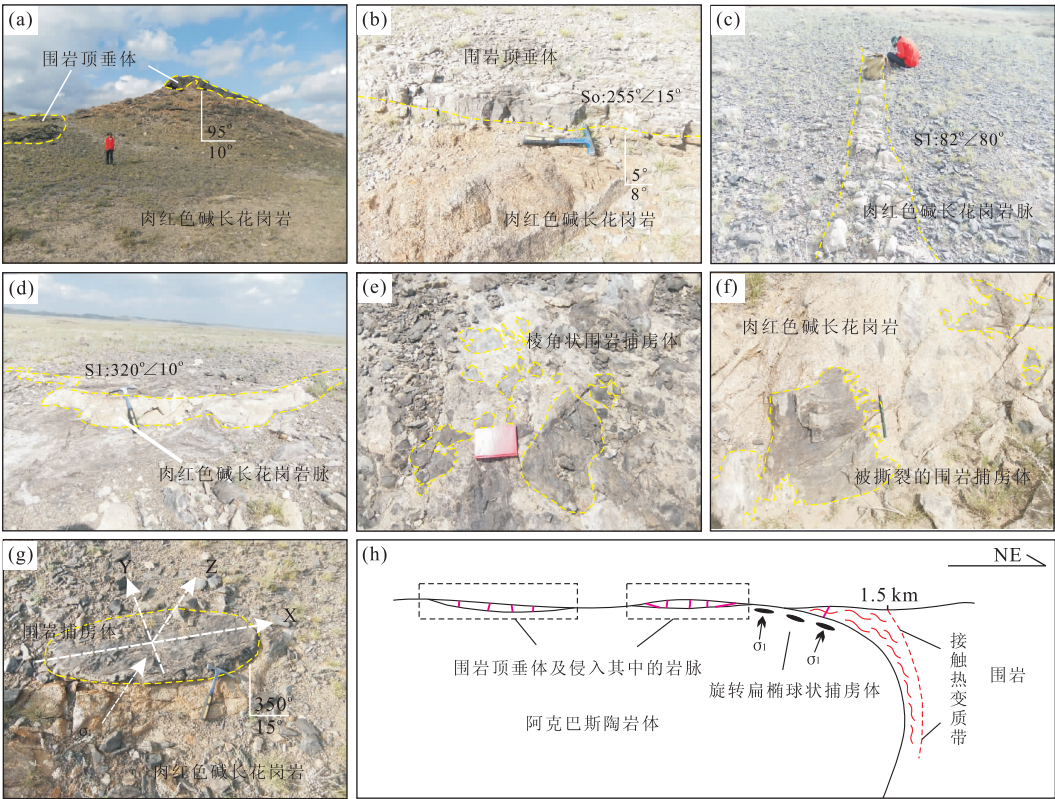


图 3 岩体 NE 侧地质特征

Fig. 3 Geological characteristics of the NE range pluton

a, b. 围岩顶垂体特征; c. 围岩顶垂体中发育的高角度岩脉; d. 围岩顶垂体中发育的低角度岩脉; e, f. 围岩捕虏体特征; g. 围岩捕虏体应力应变分析; h. 三维形态剖面

平面与应变椭球体的 XY(最大压扁面)大致平行, 最大主应力 σ_1 垂直于扁平面. 以上特征表明捕虏体基本位于岩体顶部, 在岩体侵位时主要受到了岩体高角度斜向上的顶托作用, 使其被压扁; 在后期岩浆膨胀过程中水平方向上受力较为均匀, 导致捕虏体边部被撕裂, 没有拉长定向.

阿克巴斯陶岩体 NE 侧顶垂体出露面积较大, 顶垂体与岩体接触面低缓, 顶垂体中高角度岩脉大致平行于岩体边界发育. 围岩中接触热变质带较宽, 岩体中围岩捕虏体广泛存在. 综合以上野外地质特征, 表明岩体在 NE 侧剥露程度浅, 与围岩的接触界面低缓且倾向围岩, 在此基础上笔者得出了岩体在该侧的三维形态剖面(图 3h). 岩体在该侧表现为低角度侧向膨胀就位, 膨胀过程中岩浆低角度拉扯上覆围岩, 使围岩中产生高角度裂隙, 进而形成近平行于岩体边界的高角度岩脉. 同时岩浆上升过程中垂向压扁捕获的围岩碎块, 后期岩浆侧向膨胀将捕虏体拉扯成薄片状贴在岩体顶部.

3.2 岩体 SW 侧形态分析

岩体 SW 侧围岩接触热变质带发育, 变质程度

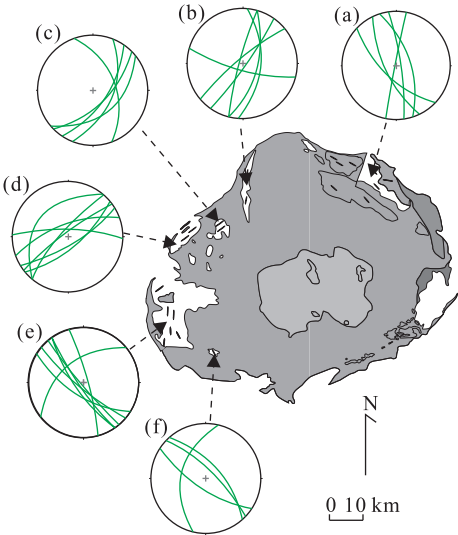


图 4 岩体顶垂体中岩脉与围岩接触面产状的下半球极射赤平投影

Fig. 4 Stereonets (equal area, projection on lower hemisphere) show orientation of the dykes

向外逐渐减弱, 肉眼能识别的变质带宽度平均为 1.4 km. 该侧同样出露大面积的围岩顶垂体, 岩性

为角岩化的凝灰质粉砂岩. 围岩和顶垂体的层理产状下半球极射赤平投影(图 5a、5b), 表明顶垂体的产状倾向明显小于围岩且倾向不稳定. 顶垂体中碱长花岗岩脉广泛发育(图 5d、5g), 岩脉与顶垂体的接触面产状下半球极射赤平投影(图 4e、4f), 表明岩脉侵入角度高, 走向呈 NW 向, 与该侧岩体边界大致平行.

该侧岩体中亦可见围岩的捕虏体, 大多数分布在岩体边部, 捕虏体呈薄片状贴在岩体之上, 形态不规则, 多呈棱角状无定向(图 5e); 其与岩体的接触面(即压扁面)产状下半球极射赤平投影(图 5c)显示出捕虏体压扁面多数倾向围岩, 倾角相对较小, 与 NE 侧的围岩捕虏体性质一致. 此外在岩体与围岩接触边界部位测得一组流面产状为 $270^{\circ}\angle 5^{\circ}$, 可代表该处岩体与围岩的接触面产状(图 5f).

阿克巴斯陶岩体 SW 侧地质特征与 NE 侧基本相同, 岩体边部围岩顶垂体面积较大, 顶垂体中高角度岩脉发育, 岩体中含有较多的围岩捕虏体, 围岩中接触热变质带较宽等. 以上特征反映出在该侧岩体

与围岩的接触边界倾角低缓且倾向围岩, 后期剥露程度浅, 因此笔者得出了岩体在 SW 侧的三维形态剖面图(图 6a). 岩体在该侧的侵位方式与 NE 侧相同, 为低角度的侧向膨胀就位. 岩浆在低角度就位过程中挤压拉扯上覆围岩, 产生高角度裂隙形成了大量高角度同侵位花岗岩脉; 同时受岩体冲顶拉扯作用, 捕虏体被压扁撕裂, 压扁面产状揭示出岩体与上覆围岩为低角度接触.

3.3 岩体 SE 侧形态分析

岩体 SE 侧出露大面积的超基性岩顶垂体; 此外该处也发育有小面积的围岩顶垂体, 均发生了强烈的角岩化. 野外可识别的围岩接触热变质带宽约 1.2 km, 从岩体边界向外分别采样, 室内镜下观察显示变质重结晶矿物主要为黑云母, 且黑云母粒度逐渐变小, 并出现红柱石雏晶, 揭示出其热变质程度逐渐减弱(图 7a~7c). 野外剖面图揭示出超基性岩与岩体的接触界面呈低缓的波状, 残余的围岩顶垂体与岩体的接触面也比较低缓; 局部测得了岩体与围岩的接触界面产状为 $160^{\circ}\angle 18^{\circ}$, 为低角度倾向围

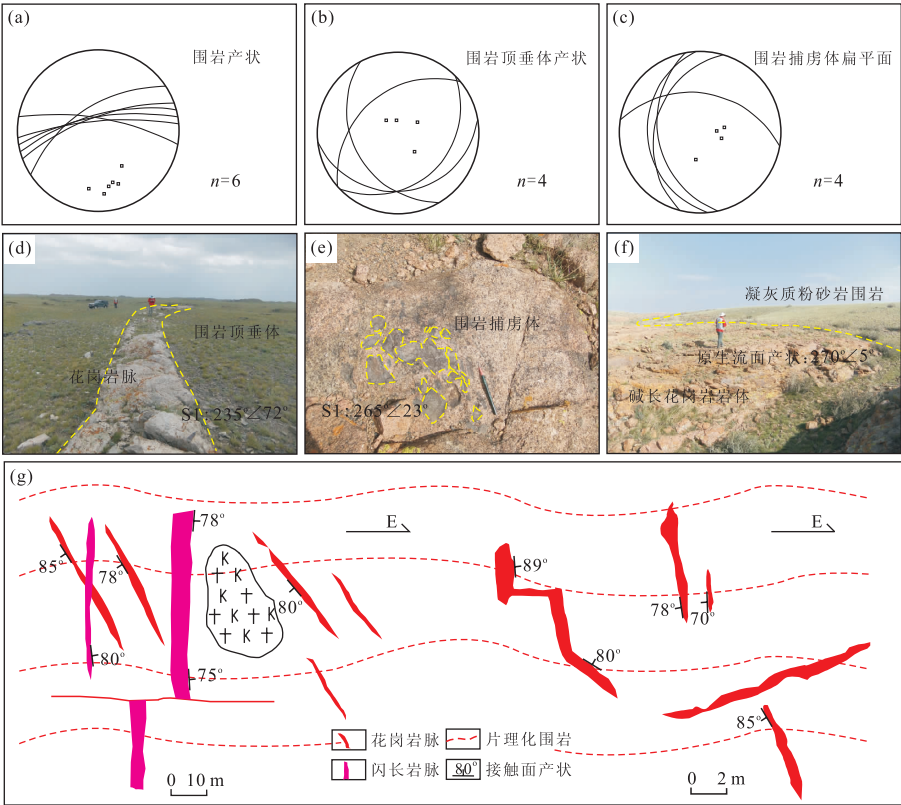


图 5 岩体 SW 侧地质特征

Fig. 5 Geological characteristics of the SW range pluton

a. 围岩产状下半球极射赤平投影; b. 围岩顶垂体产状下半球极射赤平投影; c. 围岩捕虏体扁平面产状下半球极射赤平投影; d. 顶垂体中的高角度花岗岩岩脉; e. 围岩捕虏体特征; f. 岩体与围岩的接触界面; g 岩体 SW 侧顶垂体中岩脉分布特征

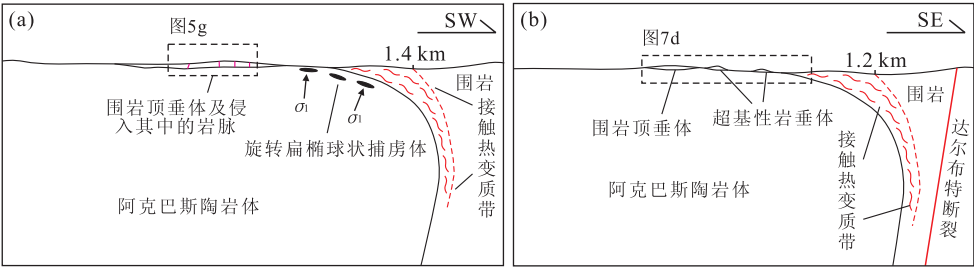


图 6 岩体 SW 侧三维形态剖面(a)和岩体 SE 侧三维形态剖面(b)
Fig. 6 Three-dimensional shape of SW range pluton (a) and SE range pluton (b)

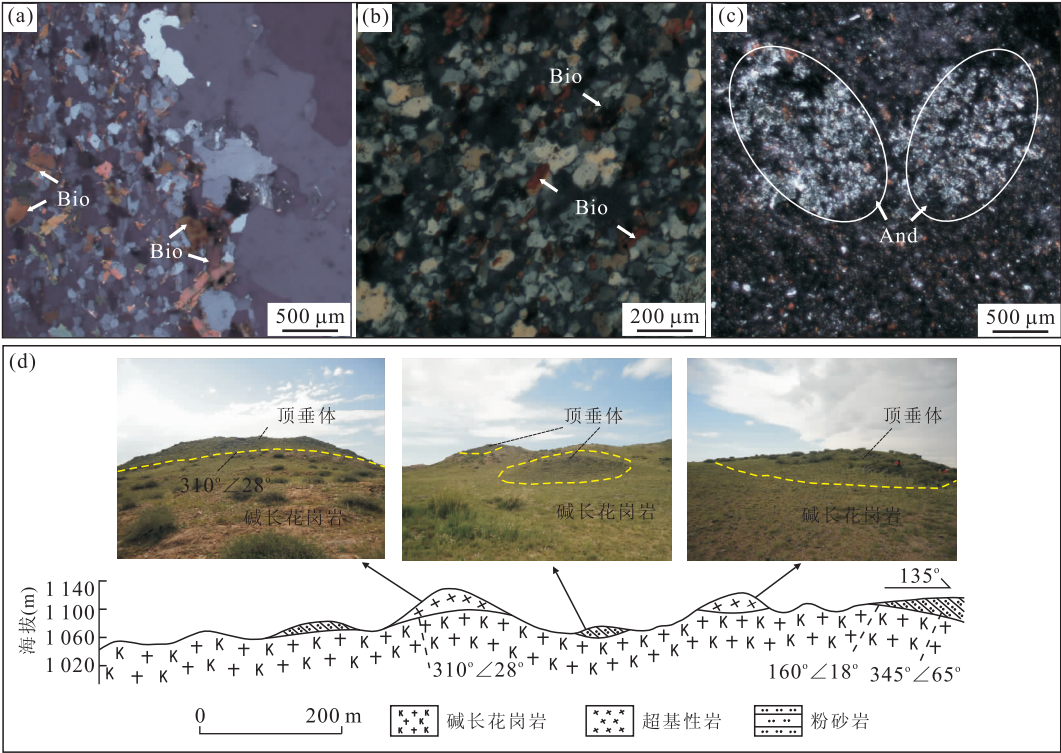


图 7 岩体 SE 侧地质特征
Fig. 7 Geological characteristics of the SE range pluton
a~c. 围岩变质重结晶镜下特征(Bio. 黑云母;And. 红柱石);d. 岩体 SE 侧地质剖面(位置见图 1a)

岩(图 7d).

阿克巴斯陶岩体在 SE 侧的地质特征,揭示出岩体在该侧的三维形态与岩体 NE 侧和 SW 侧基本相同. 岩体与围岩的接触边界低缓且倾向围岩,后期剥露程度浅,为低角度侵入就位(图 6b).

3.4 岩体 NW 侧形态分析

岩体 NW 侧与围岩的界线相对比较平直(图 1a),在该侧岩体边部,测得了 3 组岩体与围岩的接触界面产状,均显示为高角度接触,两组接触面倾向围岩,一组倾向岩体(图 8a,8b). 围岩的顶垂体出露面积小于 NE 侧和 SW 侧,岩性同样为角岩化的凝灰质粉砂岩. 边部的顶垂体与岩体的接触面陡且倾

向围岩(图 8c). 围岩中接触热变质带宽度明显小于 NE 侧、SW 侧和 SE 侧,在不同部位测得 5 处接触热变质带宽度分别为 480 m、300 m、160 m、500 m 和 605 m,平均为 409 m.

靠近岩体内部的顶垂体与岩体的接触面倾角小,常呈一种宽缓的波状(图 8d). 顶垂体中碱长花岗岩脉较为发育,岩脉与顶垂体接触面产状的下半球极射赤平投影显示,该侧发育的岩脉与 NE-SW 侧相似,均呈高角度,走向大致为 NE 或 NNE 向,与该侧岩体的边界大致平行(图 4c、4d,图 8e). 该处岩体中围岩捕虏体同样发育,形态多样,不定向分布. 代表性捕虏体形态分析结果与 NE 侧发育的捕

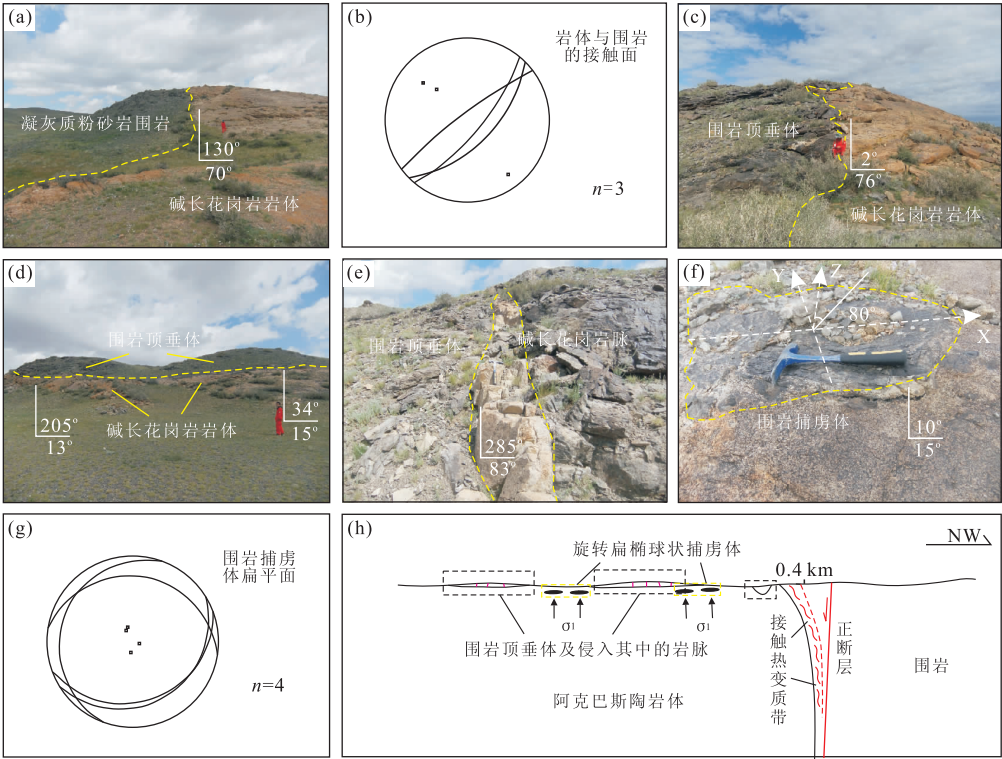


图 8 岩体 NW 侧地质特征

Fig. 8 Geological characteristics of the NW range pluton

a. 岩体与围岩的接触界线; b. 岩体与围岩的接触面产状下半球极射赤平投影; c. 顶部顶垂体与岩体的接触边界; d. 内部顶垂体与岩体的接触边界; e. 内部顶垂体中发育的高角度岩脉; f. 围岩捕虏体应力应变分析; g. 围岩捕虏体扁平面下半球极射赤平投影; h. 三维形态剖面

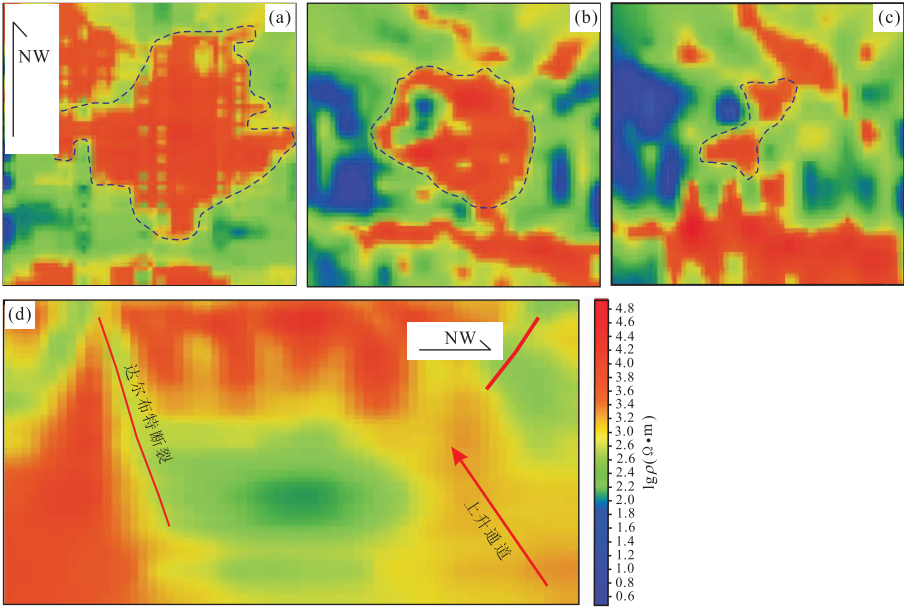


图 9 岩体大地电磁反演结果特征

Fig. 9 Inversion result of electromagnetic

a, b, c. 深度分别为 0 km、4 km、7 km 的切片; d. NW 向切片

虏体一致(图 8f),测得了 4 处围岩捕虏体扁平面(与侧岩体边界平行(图 8g).
与岩体的接触面)的产状,均显示为低角度,走向与该以上野外地质特征表明阿克巴斯陶岩体在该侧

的三维形态明显有别于 NE 侧、SW 侧和 SE 侧. 首先岩体边部显示出高角度侵入的就位特点, 岩体与围岩的接触界面陡且倾向不稳定, 岩体边部发育的围岩顶垂体与岩体的接触边界也较陡, 顶垂体中岩脉发育程度低, 围岩中接触热变质带较窄等. 但是在远离岩体边界处又出现多种类似于 NE-SW 侧低角度缓侵入的就位特点, 顶垂体与岩体接触界面角度低缓, 顶垂体中发育高角度近平行于岩体边界的岩脉, 岩体中发育扁平面近水平的围岩捕虏体等. 因此, 岩体在该侧与围岩的接触边界产状较陡, 为高角度侵入就位. 在逐渐远离边界时岩体形态变缓, 与上覆的围岩低角度接触(图 8h).

3.5 岩体音频大地电磁特征

为了准确刻画岩体更深层次的三维形态, 本项目在岩体出露区采用面积性音频大地电磁测深方法进行了三维地质填图地球物理勘探工作. 电性数据反演结果见图 9, 其中暖色调为高阻区, 表示岩体范围. 不同深度的反演结果揭示出阿克巴斯陶岩体呈倒三角锥形, 岩体横截面向深部逐渐变小, 最深处可达 7~8 km(图 9a~9c). 岩体 NW 方向上的反演结果表明岩

体的 NW 侧是岩浆主要的上升通道, 岩浆从 NW 侧向 SE 侧斜向膨胀侵位(图 9d). 笔者认为正是由于岩体侵位时岩浆上升通道位于 NW 侧, 使得岩体在 NW 侧与围岩的接触边界较陡. 最初岩浆从 NW 侧高角度上侵, 然后向其他 3 个方位侧向低角度膨胀就位.

4 讨论与结论

4.1 岩体的三维形态

通过分别对阿克巴斯陶岩体 NE、SW、SE 和 NW 侧 4 个方位地质特征的研究分析, 揭示出岩体在 NE、SW 和 SE 侧与围岩的接触边界均为低角度接触, 而岩体的 NW 侧与围岩呈高角度接触, 但 NW 侧内部仍然与上覆围岩低角度接触.

根据岩体地表出露的边界形态, 并参考三维电性反演结果, 笔者对岩体边界的三维形态进行深部延展, 得出岩体 NE-SW 向和 NW-SE 向三维剖面图. 通过 2 个方向的三维剖面图进一步建立了岩体整体的三维形态模型. 阿克巴斯陶岩体在 NE-SW 方向为两侧大致对称的蘑菇状(图 10c), 而在 NW-

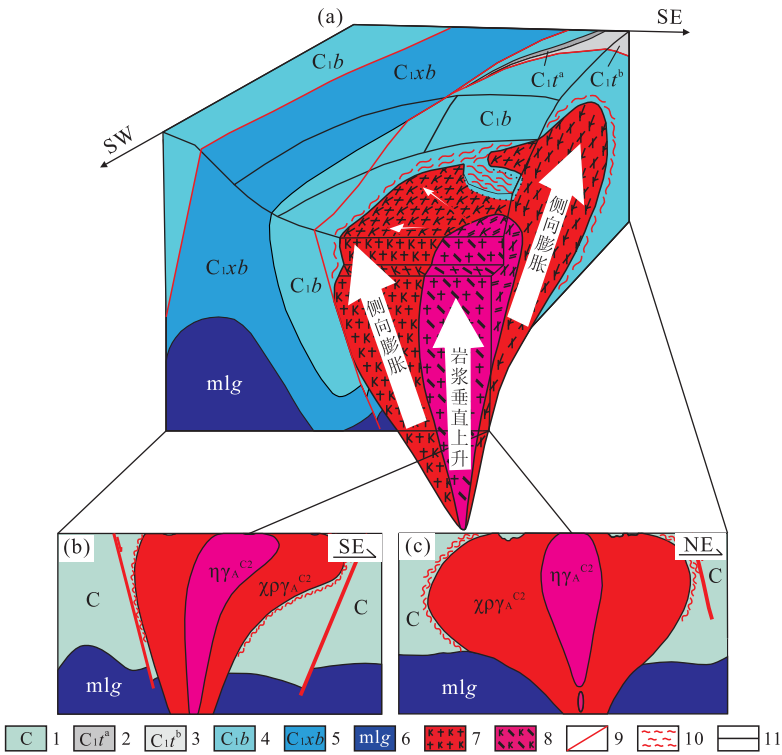


图 10 岩体三维形态模型及剖面

Fig. 10 Three-dimension configuration and three-dimensional shape of the pluton
a. 岩体三维形态模型; b. 岩体 NW-SE 向三维形态剖面; c. 岩体 NE-SW 向三维形态剖面. 1. 石炭系地层; 2. 下石炭统太勒古拉组上段; 3. 下石炭统太勒古拉组下段; 4. 下石炭统包古图组; 5. 下石炭统希贝库拉斯组; 6. 混杂岩; 7. 碱长花岗岩; 8. 二长花岗岩; 9. 断层; 10. 接触热变质带; 11. 地质界线

表 1 后造山伸展型花岗岩岩体与围岩接触面产状深部延展的宏观综合判断标志

Table 1 The macro-comprehensive judgment sign of deep extension of the contact boundary between post-collision granite and country rock

判断标志	对称型			不对称型		
	浅剥露	中等剥露	深剥露	浅剥露	中等剥露	深剥露
接触面产状	缓外倾	陡倾	内倾	一侧外倾， 一侧陡倾	一侧外倾， 一侧陡倾	一侧内倾， 一侧陡倾
围岩岩脉发育程度	发育	少量发育	不发育	不对称发育	一侧较发育	一侧少量发育
接触变质带宽度	宽	较宽	窄，变质程度高	不对称， 一侧较宽	一侧较宽	窄，变质程度高
顶垂体发育程度	常见	不发育	不发育	一侧常见	不发育	不发育
围岩包体发育程度	多	较少	少	一侧较多	一侧较发育	少
相带界线清晰程度	明显	较明显	不明显	明显	一侧明显	不明显

SE 方向上为一侧陡另一侧缓的不对称蘑菇状(图 10b),岩体整体的三维形态模型为根部向 NW 方向倾斜的不对称蘑菇型(图 10a).

4.2 岩体的侵位环境及区域构造演化探讨

笔者和前人所做的岩石地球化学数据均显示阿克巴斯陶岩体具有铝质 A 型花岗岩的性质,其和与俯冲作用有关的岛弧环境或大陆弧环境下形成的 I 型或 S 型花岗岩有明显的区别,构造环境图解显示阿克巴斯陶岩体为后造山型花岗岩(苏玉平等, 2006; 庞振甲等, 2010). 阿克巴斯陶岩体三维形态呈略不对称的蘑菇形,地表出露近等轴状,揭示出其在侵位过程中未受到区域的挤压限制,符合后造山伸展环境下形成的花岗岩特征.

石炭一二叠纪是西准噶尔地区洋一陆转换的重要时期,多年来研究者对该地区晚古生代大地构造背景的认识一直存在争议. 后造山 A 型花岗岩是区域内碰撞造山向板内阶段转化的标志,代表造山作用即将结束,区域开始进入后造山阶段. 因此阿克巴斯陶岩体伸展型花岗岩的确定,反映了西准噶尔地区晚石炭世晚期一早二叠世早期总体为后造山伸展演化阶段,西准噶尔地区洋盆闭合时限应在晚石炭世晚期之前.

4.3 理论模型

阿克巴斯陶岩体三维形态的确定,揭示了西准噶尔地区晚石炭世晚期一早二叠世为后造山伸展环境,对认识西准噶尔地区广泛发育的后造山花岗岩的三维形态具有重要的启示意义. 在本文的研究基础上,笔者提出了后造山伸展型花岗岩岩体与围岩接触面产状深部延展的宏观综合判断标志(表1)与

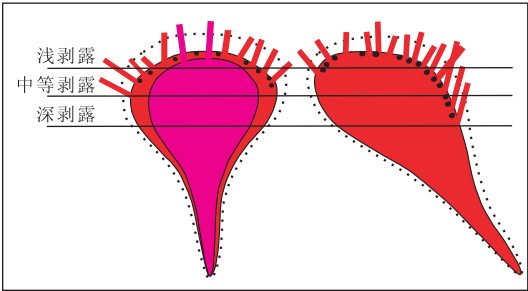


图 11 理论模型

Fig. 11 Theoretical model

理论模型(图 11). 岩体三维形态的判断标志主要包括接触面产状、岩脉发育程度、接触变质带宽度、顶垂体发育程度、围岩包体发育程度、相带界线的清晰程度等. 依据上述判断标志在岩体及围岩中的发育情况将岩体划分为浅剥露、中等剥露和深剥露 3 种类型,并进一步将岩体的三维形态分为对称型和不对称型 2 种理论模型.

4.4 结论

(1)阿克巴斯陶岩体三维形态呈不规则蘑菇状, NE、SW 和 SE 侧与围岩的接触边界均为低角度倾向围岩,而岩体的 NW 侧与围岩呈高角度接触;(2)岩体侵位时岩浆主要的上升通道位于岩体的 NW 侧,并由 NW 向朝 SE 向斜向膨胀侵位;(3)阿克巴斯陶岩体形成于后造山伸展环境中;(4)西准地区晚石炭世晚期一早二叠世早期为后造山伸展演化阶段,该地区洋盆闭合时限应在晚石炭世晚期之前.

致谢:李理、晏文博、郁军建、郭纪盛、陈旭军、赵宏伟、姜芸等对本文提出了许多建设性意见,在此致以衷心的感谢.

References

- Castro, A. , 1987. On Granitoid Emplacement and Related Structures; A Review. *Geologische Rundschau*, 76 (1): 101—124. doi:10. 1007/bf01820576
- Chen, B. , Zhu, Y. F. , 2011. Petrology, Geochemistry and Zircon U-Pb Chronology of Gabbro in Darbut Ophiolitic Mélange, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (6): 1746—1758 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. , Guo, Z. J. , 2010. Time Constraints, Tectonic Setting of Dalabute Ophiolitic Complex and Its Significance for Late Paleozoic Tectonic Evolution in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (8): 2336—2344 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. , Coleman, R. G. , Tilton, G. , et al. , 1989. Tectonic Evolution of the West Junggar Region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8 (4): 729—752. doi: 10. 1029/tc008i004p00729
- Gao, R. , Xiao, L. , Wang, G. C. , et al. , 2013. Paleozoic Magmatism and Tectonic Setting in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (10): 3413—3434 (in Chinese with English abstract).
- Geng, H. , Sun, M. , Yuan, C. , et al. , 2009. Geochemical, Sr-Nd and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Studies of Late Carboniferous Magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for Ridge Subduction? *Chemical Geology*, 266 (3): 364—389.
- Gong, Y. M. , Zong, R. W. , 2015. Paleozoic Stratigraphic Regionalization and Paleogeographic Evolution in Western Junggar, Northwestern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40 (3): 461—484 (in Chinese with English abstract). doi:10. 3799/dqkx. 2015. 038
- Gu, P. Y. , Li, Y. J. , Zhang, B. , et al. , 2009. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Gabbro in the Darbut Ophiolite, Western Junggar, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (6): 1364—1372 (in Chinese with English abstract).
- Han, B. F. , Ji, J. Q. , Song, B. , et al. , 2006. Late Paleozoic Vertical Growth of Continental Crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of Post-Collisional Plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (5): 1077—1086 (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q. , Liu, J. B. , Zhang, Y. Q. , et al. , 2007. Keramay Ophiolitic Mélange Formed during Early Paleozoic in Western Junggar Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (7): 1573—1576 (in Chinese with English abstract).
- Hutton, D. H. W. , Dempster, T. J. , Brown, P. E. , et al. , 1990. A New Mechanism of Granite Emplacement: Intrusion in Active Extensional Shear Zones. *Nature*, 343 (6257): 452—455. doi:10. 1038/343452a0
- Li, L. , Wang, G. C. , Yan, W. B. , et al. , 2015. Characteristics of Cleavages with Different Directions in Houshan Area of Karamay, Xinjiang, NW China and Their Geodynamic Background. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40 (3): 521—534 (in Chinese with English abstract). doi:10. 3799/dqkx. 2015. 041
- Ma, C. , Xiao, W. J. , Windley, B. F. , et al. , 2012. Tracing a Subducted Ridge-Transform System in a Late Carboniferous Accretionary Prism of the Southern Altsids; Orthogonal Sanukitoid Dyke Swarms in Western Junggar, NW China. *Lithos*, 140—141: 152—165.
- Pang, Z. J. , Li, Y. J. , Zhao, Y. M. , et al. , 2010. The Determination and Significance of Akebasitao Aluminous A-Type Granites in West Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 28 (2): 119—124 (in Chinese with English abstract).
- Paterson, S. R. , Vernon, R. H. , 1995. Bursting the Bubble of Ballooning Plutons: A Return to Nested Diapirs Emplaced by Multiple Processes. *Geological Society of American Bulletin*, 107 (11): 1356—1380. doi:10. 1130/0016-7606(1995)107<1356:btbpb>2. 3. co;2
- Su, Y. P. , Tang, H. F. , Hou, G. S. , et al. , 2006. Geochemistry of Aluminous A-Type Granites along Darabut Tectonic Belt in West Junggar, Xinjiang. *Geochimica*, 35 (1): 55—67 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H. , Sun, S. , Li, J. L. , et al. , 2003. Paleozoic Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang, China: Geochemical and Geochronological Constraints from the Ophiolites. *Tectonics*, 22 (2): 1—14. doi: 10. 1029/2002tc001396
- Xiao, W. J. , Han, C. M. , Yuan, C. , et al. , 2006. Unique Carboniferous-Permian Tectonic-Metallogenic Framework of Northern Xinjiang (NW China): Constraints for the Tectonics of the Southern Paleasian Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (5): 1062—1076 (in Chinese with English abstract).
- Yan, W. B. , Wang, G. C. , Li, L. , et al. , 2015. Deformation Analyses and Their Geological Implications of Carboniferous-Permian Tectonic Transformation Period in Northwest Margin of Junggar Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40 (3): 504—520 (in Chinese with English abstract). doi:10. 3799/dqkx. 2015. 040
- Yang, F. G. , Wang, Z. G. , Hou, H. Q. , et al. , 1998. Primary Magma Dynamic Investigations on the Emplacement Mechanism of Alkali Granitoids in the Eastern Part of Western Junggar, Xinjiang, China. *Acta Mineralogica*

Sinica, 18(4): 411—416 (in Chinese with English abstract).

Yang, G. X., Li, Y. J., Gu, P. Y., et al., 2012. Geochronological and Geochemical Study of the Darbut Ophiolitic Complex in the West Junggar (NW China): Implications for Petrogenesis and Tectonic Evolution. *Gondwana Research*, 21(4): 1037—1049. doi:10. 1016/j. gr. 2011. 07. 029

Yin, J. Y., Yuan, C., Sun, M., et al., 2012. Age, Geochemical Features and Possible Petrogenesis Mechanism of Early Permian Magnesian Diorite in Hatu, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2171—2182 (in Chinese with English abstract).

Zhang, C., Huang, X., 1992. The Ages and Tectonic Settings of Ophiolites in West Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 38(6): 509—524 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Y. F., Xu, X., Wei, S. N., et al., 2007. Geochemistry and Tectonic Significance of OIB-Type Pillow Basalts in Western Mts. of Karamay City (Western Junggar), NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1739—1748 (in Chinese with English abstract).

Zong, R. W., Gong, Y. M., Wang, G. C., 2014. Carboniferous Stratal Sequence and Its Palaeogeographical Evolution in Southern Western Junggar, NW China. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 216—233 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈博, 朱永峰, 2011. 新疆达拉布特蛇绿混杂岩中辉长岩岩石学微量元素地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究. *岩石学报*, 27(6): 1746—1758.

陈石, 郭召杰, 2010. 达拉布特蛇绿岩带的时限和属性以及对西准噶尔晚古生代构造演化的讨论. *岩石学报*, 26(8): 2336—2344.

高睿, 肖龙, 王国灿, 等, 2013. 西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景. *岩石学报*, 29(10): 3413—3434.

龚一鸣, 纵瑞文, 2015. 西准噶尔古生代地层区划及古地理演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(3): 461—484.

辜平阳, 李永军, 张兵, 等, 2009. 西准达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年. *岩石学报*, 25(6): 1364—1372.

韩宝福, 季建清, 宋彪, 等, 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5): 1077—1086.

何国琦, 刘建波, 张越迁, 等, 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定. *岩石学报*, 23(7): 1573—1576.

李理, 王国灿, 晏文博, 等, 2015. 西准噶尔克拉玛依后山地区不同方向劈理特征及其动力学背景. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(3): 521—533.

庞振甲, 李永军, 赵玉梅, 等, 2010. 西准阿克苏陶铝质 A 型花岗岩厘定及意义. *新疆地质*, 28(2): 119—124.

苏玉平, 唐红峰, 侯广顺, 等, 2006. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质 A 型花岗岩的地球化学研究. *地球化学*, 35(1): 55—67.

肖文交, 韩春明, 袁超, 等, 2006. 新疆北部石炭纪—二叠纪独特的构造—成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约. *岩石学报*, 22(5): 1062—1076.

晏文博, 王国灿, 李理, 等, 2015. 准噶尔西北缘石炭—二叠纪构造转换期变形分析及其地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(3): 504—520.

杨富贵, 王中刚, 侯鸿泉, 等, 1998. 西准噶尔东部碱性花岗岩体侵位机理的岩浆动力学初步探讨. *矿物学报*, 18(4): 411—416.

尹继元, 袁超, 孙敏, 等, 2012. 新疆哈图早二叠世富镁闪长岩的时代、地球化学特征和可能的成因机制. *岩石学报*, 28(7): 2171—2182.

张弛, 黄莹, 1992. 西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的讨论. *地质评论*, 38(6): 509—524.

朱永峰, 徐新, 魏少妮, 等, 2007. 西准噶尔克拉玛依 OIB 型枕状玄武岩地球化学及其地质意义研究. *岩石学报*, 23(7): 1739—1748.

纵瑞文, 龚一鸣, 王国灿, 2014. 西准噶尔南部石炭纪地层层序及古地理演化. *地学前缘*, 21(2): 216—233.