第38卷 第2期
2019年3月

岩 石 矿 物 学 杂 志
ACTA PETROLOGICA ET MINERALOGICA

Vol. 38，No. 2：145～159
Mar.，2019

·专题研究·

北祁连造山带窑洞沟地区中奥陶世花岗岩成因
——锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约

卜 涛，王国强，唐 卓，罗根根，朱 涛，计 波，过 磊
（中国地质调查局造山带地质研究中心 西安地质调查中心，陕西 西安 710054；自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室 西安地质调查中心，陕西 西安 710054）

摘 要：对北祁连造山带窑洞沟地区花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年以及主量和微量元素地球化学分析，结果表明，窑洞沟花岗岩的结晶年龄为 466±2 Ma。窑洞沟花岗岩具有较高的 SiO_2（72.45%～80.18%）和全碱含量（Alk）（6.04%～8.12%），且 K_2O 含量低，K_2O/Na_2O 值为 0.07～0.71，里特曼指数在 0.96～2.16 之间，小于 3.3，铝饱和指数（A/CNK）为 0.94～1.01，为低钾到中钾钙碱性系列的准铝质岩石；在球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图上表现出轻稀土元素富集的右倾型，具有中等的负 Eu 异常，δEu 介于 0.67～0.81 之间，在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上明显富集 Rb、K 等大离子亲石元素和 Th、U 等放射性元素，亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素，在 $P_2O_5-SiO_2$ 协变关系图上与 I 型花岗岩趋势一致，在 Y－Rb 图上显示出分异 I 型花岗岩的特征。结合区域地质背景，认为窑洞沟花岗岩的形成可能与北祁连洋盆持续向北俯冲导致弧后拉张伸展，诱发幔源岩浆岩底侵上升，致使古老地壳物质重熔形成母岩浆，再经历中等程度分离结晶作用有关，其岩浆具有岛弧岩浆属性，可能是由于弧后盆地在岛弧的基础上裂开或者其岩浆源区受到了俯冲板片流体/熔体的改造作用。

关键词：锆石 U-Pb 定年；地球化学；I 型花岗岩；弧后盆地；北祁连；甘肃
中图分类号：P588.12^{+}1；P595 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6524(2019)02－0145－15

Petrogenesis of the middle Ordovician granite in the Yaodonggou area of the North Qilian orogenic belt: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry

BU Tao, WANG Guo-qiang, TANG Zhuo, LUO Gen-gen, ZHU Tao, JI Bo and GUO Lei
(Research Center for Orogenic Geology, Xi' an Center of Geological Survey, Xi' an 710054, China; MNR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi' an Center of Geological Survey, Xi' an 710054, China)

Abstract: This paper reports LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data as well as whole rock major and trace element data from granite pluton in the Yaodonggou area of the North Qilian orogenic belt. The result shows that the pluton was emplaced at 466±2 Ma. The Yaodonggou granite contains high SiO_2(72.45%～80.18%) and Alk (6.04%～8.12%). Its K_2O content is less than that of Na_2O with K_2O/Na_2O ratio of 0.07～0.71, Ritterman index of 0.96～2.16 (less than 3.3), and A/CNK of 0.94～1.01. The granite belongs to low-medial potassium calcium alkaline series quasi-aluminum rocks. The chondrite-normalized REE patterns show the right-inclined type of LREE enrichment, with a medium negative Eu anomaly and δEu of 0.67～0.81. The primitive mantle-normalized spidergram shows depletion of Nb, Ta, Ti, P and enrichment of Rb, K, U. The $P_2O_5-SiO_2$ diagram shows the trend of

收稿日期：2018－09－25；接受日期：2019－01－08；编辑：尹淑苹
基金项目：中国地质调查局基金项目（DD20160012，DD20190812）；国家自然科学基金资助项目（41703038）
作者简介：卜 涛（1986－ ），男，硕士，工程师，主要从事岩浆岩岩石学、岩石地球化学方面的研究，E-mail：cugbutao@163.com。

I- type granite. The Y－Rb diagram shows the characteristics of differentiated I-type granite. Combined with the regional geological background, the authors hold that the formation of the Yaodonggou granite was probably related to the northward subduction of the North Qilian Ocean Basin, which led to the back-arc extension and mantle-derived magmatic intrusion and uplift. As a result, the ancient crustal material was remelted to form parent magma, then it was subjected to moderate crystallization differentiation. The magma had the property of island arc magma, which might have been attributed to the fact that the back arc basin was split on the basis of island arc or its magma source area was reformed by subduction plate fluid or melt.

Key words: U-Pb zircon dating; geochemistry; I-type granite; back-arc basin; North Qilian; Gansu

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20160012, DD20190812); National Natural Science Foundation of China (41703038)

北祁连造山带是一个具有完整沟-弧-盆体系的加里东期造山带(夏林圻等，1991，1992，1995，1996，1998，2001；冯益民等，1992；许志琴等，1994；冯益民，1997；张建新等，1997，1998；左国朝等，1997；张旗等，2003；杜远生等，2004；徐学义等，2008)，自20世纪70年代以来，随着板块构造理论的发展，围绕火山岩、蛇绿岩、基底构造属性、变质变形作用、洋盆俯冲极性及大地构造演化等多个方面的关键科学问题，开展了广泛而深入的研究(李春昱等，1980；Wu *et al.*，1993；冯益民等，1996；左国朝等，1997；葛肖虹等，1999；夏林圻等，1998，2001，2016；杜远生等，2002，2004；Xia *et al.*，2003；Zhang *et al.*，2007；Song *et al.*，2007a，2009a；Xiao *et al.*，2009)，近年来，随着高压-超高压变质带的发现，极大地激发了地质学家对祁连造山带早古生代板块俯冲-碰撞-拼贴过程研究的兴趣，也取得了许多重要进展(Wu *et al.*，1993；许志琴等，1994；杨经绥等，1998；Song *et al.*，2004a，2006，2007a，2009a，2013；Zhang *et al.*，2007，2012)，但是，关于北祁连洋盆的俯冲极性存在多种认识：① 向北俯冲，主要依据是北祁连造山带自南向北发育洋壳残片、俯冲杂岩带、弧火山岩带和花岗岩带、弧后盆地火山岩和花岗岩带、志留纪到泥盆纪的磨拉石建造以及向南-南西方向逆冲的韧性剪切带(夏林圻等，1991，1995，1996，1998，2001；许志琴等，1994；杜远生等，2002，2004；Yang *et al.*，2002；Xu *et al.*，2006；Song *et al.*，2006，2013)；② 向南俯冲，主要依据南、北深、浅俯冲杂岩可能代表了同一俯冲带不同层次或向北的后退式俯冲，南侧与中祁连地块结合带发育岛弧火山岩和陆缘弧花岗岩(周德进等，1997；Gerhrels and Yin，2003；Gerhrels *et al.*，2003；Cowging *et al.*，2003；Yin *et al.*，2007；Xiao *et al.*，2009)；③ 双向俯冲，主要依据是两边都存在古生代花岗岩类(左国朝等，1987；吴才来等，2006，2010；秦海鹏等，2014)。其次，关于北祁连洋盆开始俯冲的时限，大多数学者认为最早俯冲时间可能为495 Ma或者更早(冯益民，1997；张招崇等，2001；史仁灯等，2004；吴才来等，2006，2010；相振群等，2007；Tseng *et al.*，2009；Yan *et al.*，2010；夏小洪等，2010；Song *et al.*，2013；夏林圻等，2016)；也有学者认为俯冲开始时间稍晚于早中奥陶世(林宜慧等，2010)；再者，研究区岩浆岩发育，但目前尚未有相关年代学和岩石地球化学方面的报道，花岗岩作为了解地球内部的“探针”和“窗口”，记录着大量构造演化方面的信息(Ma *et al.*，2004；莫宣学，2011)。因此，本文拟以北祁连窑洞沟地区早古生代花岗岩为研究对象，在详细的野外调研的基础上，以系统的锆石U-Pb年代学、岩石地球化学为研究手段，精确厘定窑洞沟花岗岩的形成时代、探讨窑洞沟花岗岩的岩石成因、构造环境及地球动力学意义，为北祁连早古生代洋盆俯冲机制及构造演化方面的研究提供新的证据。

1 区域地质背景

北祁连造山带处于秦-祁-昆巨型造山系的中段，挟持于阿拉善地块、塔里木板块与中祁连地块之间，呈NW-SE向展布，长约1 200 km，宽约100～300 km，该造山带北边以龙首山断裂为界，南界为中祁连北缘断裂，西端被阿尔金左行走滑断裂截切，东端为同心-固原右行走滑断裂。自北向南可以划分为弧后盆地、北祁连岛弧、俯冲杂岩和消减洋壳残片等不同的构造单元(冯益民等，1996)。造山带内花岗质侵入体发育，主要沿岛链延伸方向出露，岩石类型主要有花岗闪长岩、花岗岩、二长花岗岩及英云闪长岩等。锆石U-Pb年代学表明它们的形成时代多集中

在 512 ~ 402 Ma，最晚形成于 383 Ma（吴才来等，2004，2006，2010；秦海鹏，2012；熊子良等，2012），这些花岗岩体主要以 Ⅰ 型花岗岩为主，少量表现出类似于 S 型花岗岩特点，如柴达诺花岗岩体和民乐窑沟花岗闪长岩（吴才来等，2010），还有一些表现出 A 型花岗岩的特征，如武威一带 422 ~ 418 Ma 二长花岗岩（秦海鹏，2012）和黄羊河 404 Ma 的钾长花岗岩（熊子良等，2012），这些花岗岩体被认为是北祁连洋壳俯冲、碰撞及造山后垮塌作用的产物。本文研究的窑洞沟侵入体位于甘肃省肃南县西水乡窑洞沟到黄草沟一带，主要由 4 个小岩体组成，呈不规则状、条带状展布，与奥陶系阴沟群火山岩呈侵入接触关系，出露面积约 9 km^2。岩性上以中粗粒的花岗岩为主，局部地段可见二长花岗岩和花岗闪长岩出露。大地构造位置上位于前人划分的走廊弧后盆地上（图 1）。

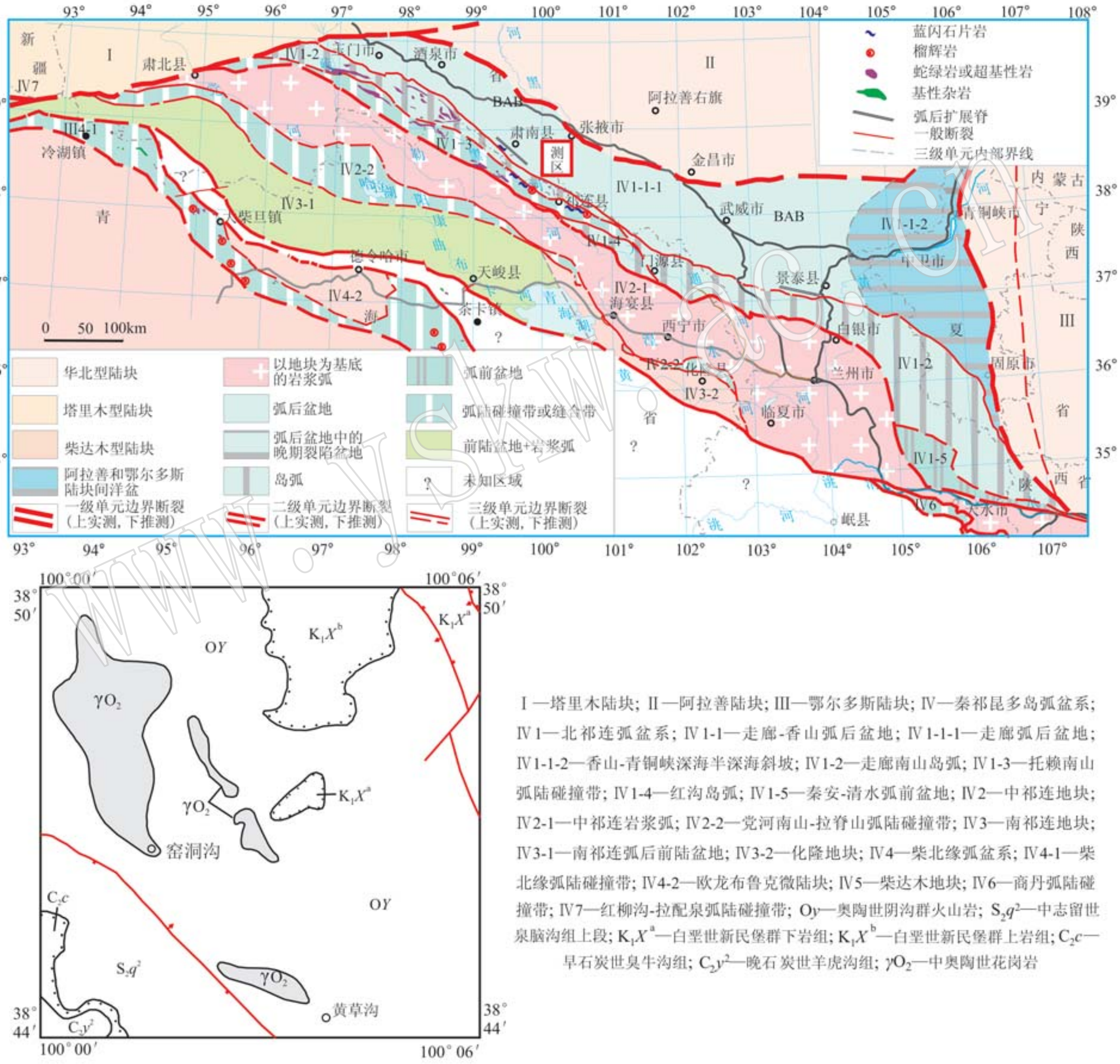

图 1　北祁连造山带构造单元划分图（据冯益民等，1996 修改）及窑洞沟岩体分布图
Fig. 1　Tectonic subdivisions (after Feng Yimin *et al.*, 1996) and distribution of granite in the Yaodonggou area, Gansu

2　岩相学特征

窑洞沟岩体主体上为灰白色中粗粒花岗岩，岩石新鲜面呈灰色-灰白色，中-粗粒花岗结构，块状构造，主要组成物质有斜长石、碱性长石、石英及极少量的暗色矿物，其中，斜长石白色到乳白色，呈半自形板柱状结构，含量 10% ~ 12%，板径 2 ~ 6 mm，双晶发育，边缘熔蚀明显，蚀变较弱，为微弱的钠黝帘石化，测得 An = 18 ~ 20，为酸性的更长石，碱性长石

为半自形-它形板状结构，含量50%～52%，内部由于应力作用多数呈现多晶化或角砾化，条纹发育，无双晶，蚀变弱，负低突起，Ⅰ级灰白干涉色；石英为它形晶，无蚀变，无解理，含量28%～30%，波状消光和变形纹比较发育，粒径稍微小于长石，正低突起，Ⅰ级灰白干涉色，岩石中还可见少量黑云母及后期蚀变矿物，含量6%左右(图2)。岩体整体蚀变较强，多见硅化，绿泥石化、褐铁矿化蚀变。

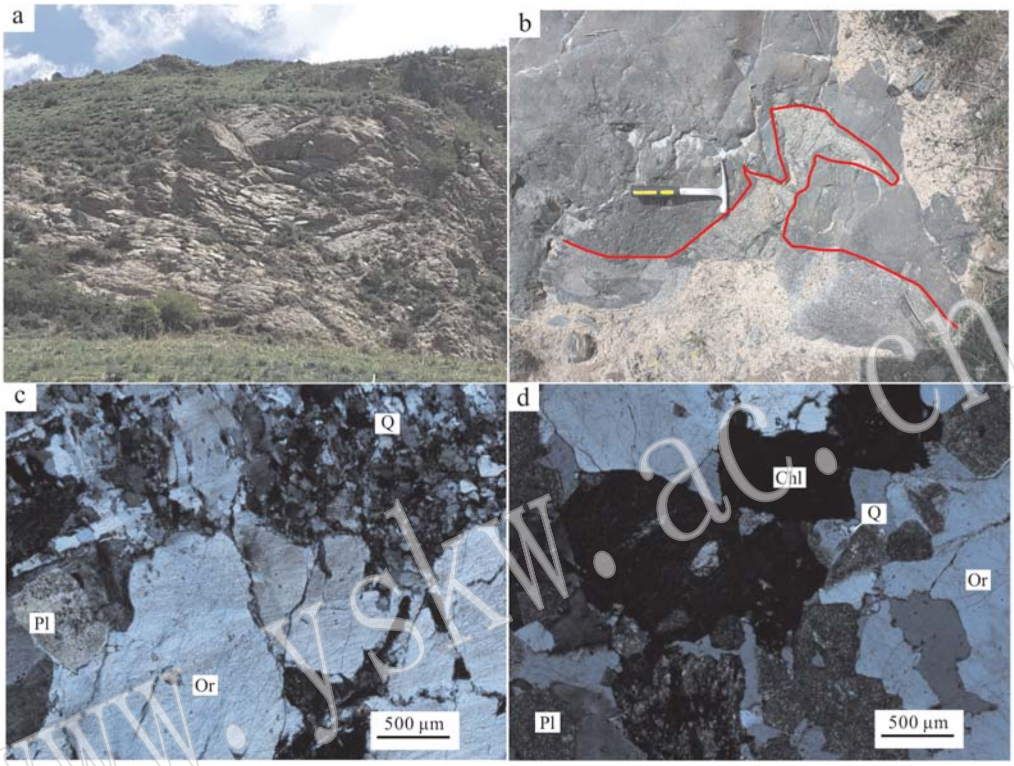

图2　窑洞沟岩体野外及镜下照片(+)

Fig. 2　Field photographs and microphotographs of granite in the Yaodonggou area, Gansu(+)

Q—石英；Pl—斜长石；Or—碱性长石；Chl—绿泥石

Q—quartz; Pl—plagioclase; Or—alkaline feldspar; Chl—chlorite

3　LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

3.1 分析方法

对样品(2017YT3)中挑选出的锆石进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素检测工作。锆石样品靶的制作、阴极发光(CL)检测照片的拍摄及U-Pb微区同位素测定均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。首先，在显微镜下挑选出透光性好、晶型完整无裂纹、粒径较大的锆石放置在双面胶纸上，灌注环氧树脂，待其固化后打磨并抛光，使锆石中心暴露，然后拍摄阴极发光图像，用于测定时选取锆石颗粒和测试部位。锆石阴极发光(CL)检测在电子探针实验室MonoCL3系统上完成，检测时其电子束加速电压为10 kV。锆石U-Pb微区同位素测定在电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7500a)与准分子激光剥蚀系统(GeoLas 2005)联机完成，测试时激光束斑直径为32 μm，剥蚀深度为20～40 μm，实验中采用He作为剥蚀物质的载气，用NISTSRM 610对仪器进行优化，锆石年龄采用标准锆石91500作为外标，用^{29}Si作内标，NISTSRM610作外标来校正微量元素含量，数据处理采用Glitter 4.0软件完成。按照Common Pb Correction(ver3.15)方法对普通Pb进行校正(Andersen, 2002)，应用ISOPLOT 3.0程序(Ludwing, 2003)进行锆石年龄加权平均值计算及U-Pb谐和图的绘制。

3.2　分析结果

显微镜下观测结果显示，样品中的锆石自形程度较高，多呈长柱状-柱状，无色透明，长度大多在100～200 μm之间，长宽比为2∶1，阴极发光(CL)图

像（图 3）显示清晰的岩浆型锆石的振荡环带。样品（2017YT3）共进行了 30 颗锆石颗粒的测定，分析结果见表 1。测点中 Th 的含量变化范围为 $116.55 \times 10^{-6} \sim 500.68 \times 10^{-6}$，U 的含量变化范围为 $294.88 \times 10^{-6} \sim 657.04 \times 10^{-6}$，Th/U 值较大，变化于 0.39～0.88，平均值 0.60，且 Th、U 之间正相关性较好，说明锆石为岩浆成因（Claesson *et al.*，2000；Belousova *et al.*，2002；吴元保等，2004）。剔除 1 个不谐和点（2017YT3-23），有 29 个测点在谐和线上或其附近，$^{206}Pb/^{238}U$ 的表面年龄范围为 470 ± 5 Ma～462 ± 5 Ma，$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 466 ± 2 Ma，置信度 95%，MSWD = 0.13（图 4），这一年龄解释为花岗岩的结晶年龄，对应地质历史时期的中奥陶世。

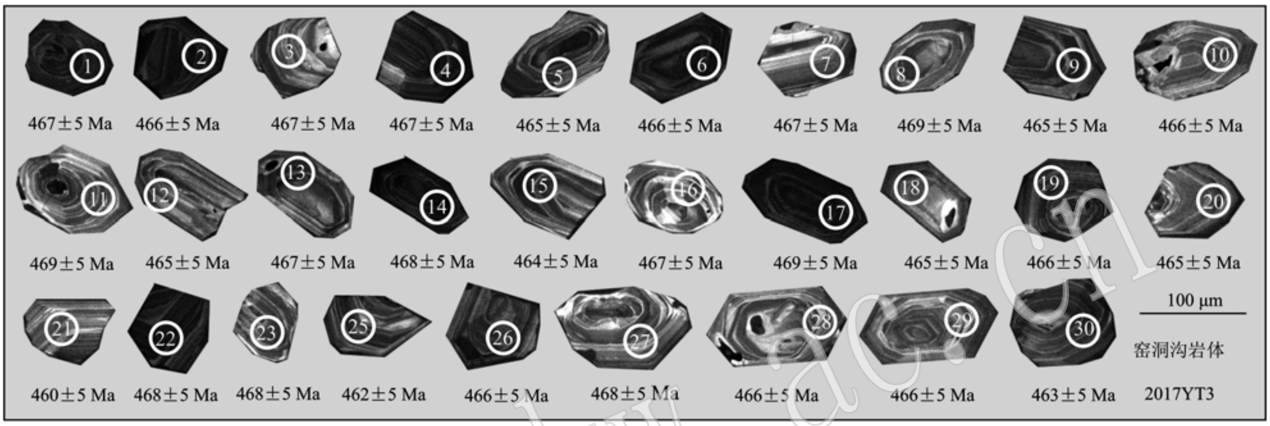

图 3 窑洞沟花岗岩锆石阴极发光检测图像（CL）及测试位置

Fig. 3 Measuring position and CL images of zircon grains from granite in the Yaodonggou area，Gansu

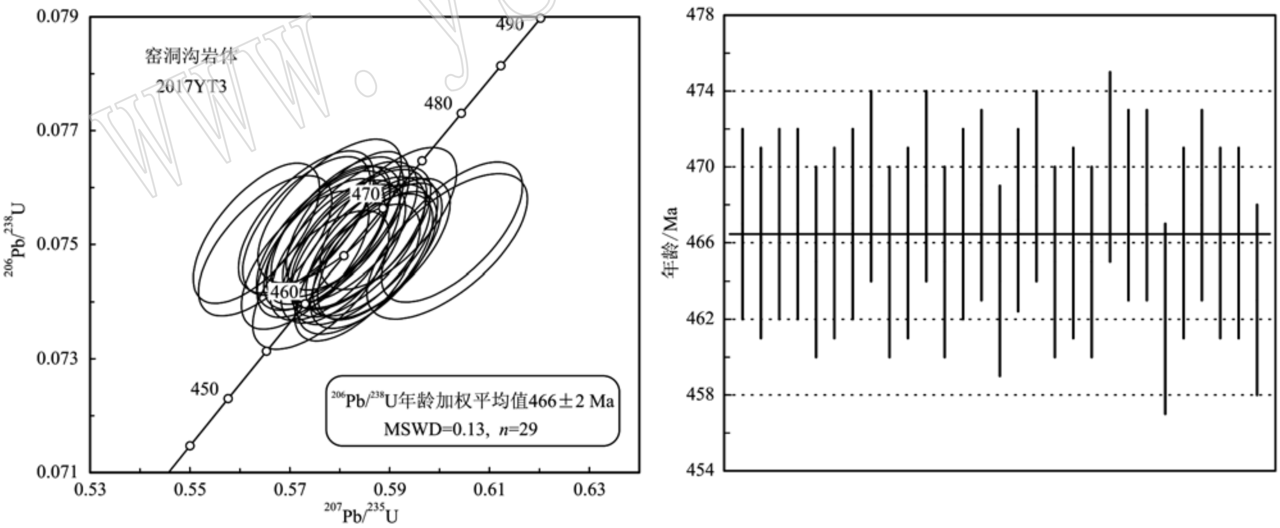

图 4 窑洞沟花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram of zircon from granite in the Yaodonggou area，Gansu

4 地球化学特征

花岗岩的主量、微量元素分析测试均在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心完成，其中，主量元素中的 Fe_2O_3 和 FeO 采用湿化学分析法测试完成，其余主量元素采用荧光光谱法完成，分析仪器为 Panalytical 公司生产的 PW440 型 X 荧光光谱仪（XRF），分析误差低于 5%，微量元素和稀土元素测试仪器为 Thermo Fisher 公司生产的 X-Series Ⅱ 型电感耦合等离子质谱仪（ICP-MS），检测限优于 5×10^{-9}，相对标准偏差低于 5%。

表 1　窑洞沟花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据

Table 1　LA-ICP-MS U-Pb isotopic composition of the zircon of the granite in the Yaodonggou area，Gansu

分析点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ
2017YT3-01	316.24	487.76	0.648 352	0.054 33	0.000 80	0.563 31	0.008 35	0.075 20	0.000 81	385	16	454	5	467	5
2017YT3-02	191.18	389.83	0.490 419	0.056 08	0.000 83	0.579 10	0.008 58	0.074 90	0.000 81	456	16	464	6	466	5
2017YT3-03	123.59	294.88	0.419 120	0.055 79	0.000 92	0.577 72	0.009 51	0.075 11	0.000 83	444	18	463	6	467	5
2017YT3-04	218.49	457.99	0.477 063	0.055 77	0.000 80	0.577 40	0.008 33	0.075 08	0.000 80	443	15	463	5	467	5
2017YT3-05	299.96	509.61	0.588 607	0.055 62	0.000 82	0.573 08	0.008 43	0.074 73	0.000 80	437	16	460	5	465	5
2017YT3-06	201.11	325.66	0.617 546	0.054 66	0.000 85	0.565 07	0.008 82	0.074 98	0.000 81	398	17	455	6	466	5
2017YT3-07	125.22	304.22	0.411 610	0.056 37	0.000 92	0.583 90	0.009 46	0.075 13	0.000 82	467	18	467	6	467	5
2017YT3-08	288.21	388.85	0.741 160	0.056 68	0.000 87	0.589 73	0.009 03	0.075 46	0.000 82	479	16	471	6	469	5
2017YT3-09	332.03	657.04	0.505 342	0.056 28	0.000 79	0.580 72	0.008 23	0.074 84	0.000 80	463	15	465	5	465	5
2017YT3-10	315.57	524.33	0.601 854	0.055 77	0.000 82	0.576 24	0.008 44	0.074 94	0.000 80	443	16	462	5	466	5
2017YT3-11	350.48	534.58	0.655 617	0.055 14	0.000 86	0.573 28	0.008 95	0.075 40	0.000 82	418	17	460	6	469	5
2017YT3-12	235.32	353.39	0.665 893	0.056 64	0.000 88	0.584 39	0.009 06	0.074 83	0.000 81	478	17	467	6	465	5
2017YT3-13	465.51	527.31	0.882 818	0.056 38	0.000 87	0.583 79	0.008 99	0.075 09	0.000 81	467	17	467	6	467	5
2017YT3-14	224.48	415.42	0.540 395	0.055 80	0.000 84	0.579 50	0.008 75	0.075 31	0.000 81	444	16	464	6	468	5
2017YT3-15	266.91	440.29	0.606 191	0.056 83	0.000 87	0.585 08	0.008 95	0.074 66	0.000 81	485	16	468	6	464	5
2017YT3-16	500.68	567.98	0.881 510	0.055 74	0.000 79	0.577 73	0.008 20	0.075 17	0.000 80	442	31	463	5	467	5
2017YT3-17	418.38	649.02	0.644 633	0.055 93	0.000 78	0.581 62	0.008 15	0.075 42	0.000 80	450	15	466	5	469	5
2017YT3-18	444.71	604.14	0.736 088	0.056 94	0.000 81	0.586 77	0.008 35	0.074 73	0.000 79	489	15	469	5	465	5
2017YT3-19	178.05	379.52	0.469 145	0.058 19	0.001 04	0.601 51	0.010 61	0.074 97	0.000 84	537	20	478	7	466	5
2017YT3-20	441.21	583.66	0.755 937	0.056 95	0.000 79	0.588 02	0.008 22	0.074 88	0.000 79	490	15	470	5	465	5
2017YT3-21	179.36	301.36	0.595 169	0.055 45	0.000 91	0.577 96	0.009 48	0.075 59	0.000 83	430	18	463	6	470	5
2017YT3-22	167.83	387.01	0.433 658	0.056 11	0.000 86	0.582 06	0.008 91	0.075 23	0.000 81	457	17	466	6	468	5
2017YT3-23	214.31	409.08	0.523 883	0.055 20	0.000 81	0.573 33	0.008 43	0.075 33	0.000 80	420	16	460	5	468	5
2017YT3-25	116.55	295.73	0.394 109	0.056 18	0.000 88	0.576 22	0.009 02	0.074 38	0.000 80	459	17	462	6	462	5
2017YT3-26	226.58	401.63	0.564 151	0.056 47	0.000 86	0.583 68	0.008 89	0.074 96	0.000 81	471	16	467	6	466	5
2017YT3-27	223.36	412.16	0.541 925	0.058 09	0.000 90	0.602 47	0.009 32	0.075 22	0.000 81	533	17	479	6	468	5
2017YT3-28	219.59	394.29	0.556 925	0.056 74	0.000 84	0.586 42	0.008 73	0.074 96	0.000 80	481	16	469	6	466	5
2017YT3-29	275.04	458.21	0.600 249	0.056 95	0.000 88	0.588 37	0.009 07	0.074 93	0.000 81	490	17	470	6	466	5
2017YT3-30	363.10	571.42	0.635 435	0.056 80	0.000 80	0.583 53	0.008 28	0.074 51	0.000 79	484	15	467	5	463	5

4.1 主量元素

窑洞沟岩体的主量元素分析结果及特征参数见表2。据表可知，灰白色中粗粒花岗岩具有极高的 SiO_2 含量，介于72.45% ~80.18%之间，全碱含量为

表 2　窑洞沟地区花岗岩主量元素（w_B/%）和微量元素（w_B/10^{-6}）分析数据

Table 2　Chemical compositions of major elements（w_B/%）and trace elements（w_B/10^{-6}）for granite in the Yaodonggou area，Gansu

样号	2017YT-3-1H	2017YT-3-2H	2017YT-3-3H	2017YT-3-4H	2017YT-3-5H	2017YT-3-6H
SiO_2	74.70	73.70	79.36	77.88	80.18	72.45
Al_2O_3	12.46	12.75	11.23	11.76	10.16	13.57
Fe_2O_3	0.34	0.30	0.11	0.13	0.17	0.49
FeO	1.06	1.23	0.66	0.82	0.55	1.24
CaO	1.34	1.45	0.74	0.80	1.08	1.21
MgO	0.71	0.81	0.46	0.53	0.35	0.91
K_2O	2.70	2.89	0.43	0.96	1.65	3.30
Na_2O	4.64	4.65	5.75	5.78	4.31	4.67
TiO_2	0.20	0.22	0.16	0.16	0.13	0.24
P_2O_5	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.06
MnO	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.05
灼失	1.64	1.83	0.98	1.07	1.29	1.72
H_2O^+	0.74	0.84	0.48	0.50	0.56	0.98
Alk	7.47	7.69	6.25	6.82	6.04	8.12
K_2O/Na_2O	0.58	0.62	0.07	0.17	0.38	0.71
A/CNK	0.96	0.95	1.00	0.98	0.94	1.01
La	20.60	16.60	10.80	14.00	16.20	21.40
Ce	34.00	25.70	21.20	27.50	31.60	40.70
Pr	5.30	4.63	2.30	3.14	3.53	5.62
Nd	19.00	16.80	7.88	11.00	11.50	20.00
Sm	3.86	3.21	1.37	1.91	2.08	3.75
Eu	0.85	0.78	0.29	0.43	0.53	0.87
Gd	3.55	2.97	1.21	1.80	1.83	2.92
Tb	0.58	0.47	0.19	0.27	0.28	0.45
Dy	3.42	2.66	1.02	1.54	1.62	2.56
Ho	0.68	0.56	0.21	0.32	0.34	0.56
Er	1.96	1.59	0.59	0.96	0.95	1.65
Tm	0.30	0.26	0.096	0.15	0.16	0.26
Yb	1.98	1.72	0.66	1.03	1.02	1.79
Lu	0.31	0.28	0.10	0.17	0.17	0.28
Y	24.80	16.30	4.86	8.65	9.26	14.30
ΣREE	121.19	94.53	52.78	72.87	81.07	117.11
δEu	0.69	0.76	0.67	0.70	0.81	0.77
$(La/Sm)_N$	3.45	3.34	5.09	4.73	5.03	3.68
$(La/Yb)_N$	7.46	6.92	11.74	9.75	11.39	8.58
$(Gd/Yb)_N$	1.48	1.43	1.52	1.45	1.48	1.35
Cu	4.79	4.85	12.10	7.79	40.10	6.34
Pb	8.38	7.79	9.05	7.38	8.80	10.20
Zn	15.40	16.00	16.20	15.70	10.80	19.00
Cr	3.92	2.70	2.50	3.38	2.19	3.55
Ni	0.72	3.55	1.78	0.12	0.53	1.04
Co	1.98	2.19	1.36	1.75	1.96	2.51
Li	6.18	7.12	2.52	2.75	3.42	7.26
Rb	58.90	49.30	14.00	24.50	37.90	74.20
Cs	0.92	0.89	0.65	0.49	0.85	1.04
Sr	79.40	66.80	81.10	75.30	91.50	103.00
Ba	494	518	87.9	224	360	612
V	14.80	16.70	5.36	5.24	4.64	20.20
Sc	7.63	11.30	9.40	11.40	5.81	7.68
Nb	5.88	7.25	4.56	5.67	4.78	7.30
Ta	0.48	0.56	0.38	0.45	0.36	0.56
Zr	127	133	112	122	97	147
Hf	3.50	3.88	2.92	3.33	2.67	4.17
Be	1.10	1.08	0.86	0.93	1.04	1.28
Ga	10.8	11.00	8.38	9.86	8.55	12.40
U	2.16	2.46	1.72	1.99	1.98	3.04
Th	11.30	11.20	5.51	7.10	7.37	12.00

6.04% ~8.12% 且 K_2O 小于 Na_2O，K_2O/Na_2O 值为0.07 ~0.71，Al_2O_3含量较低，Al_2O_3含量介于10.16% ~13.57%，A/CNK 介于 0.94 ~1.01，平均为0.97；岩石里特曼指数在0.96 ~2.16 之间，均小于3.3；在(Na_2O+K_2O)−SiO_2图上(图5)，均落入

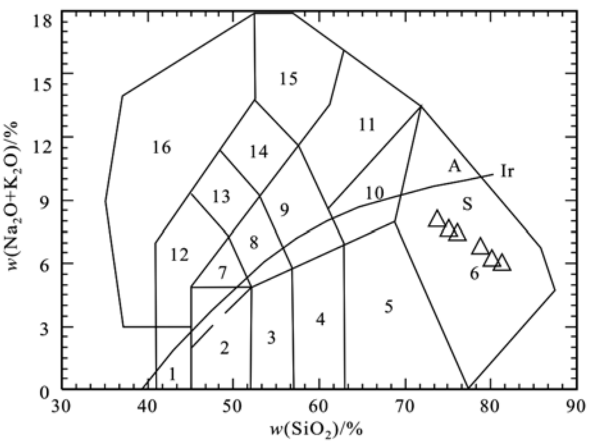

图5 窑洞沟花岗岩体(Na_2O+K_2O)−SiO_2 图(底图据 Cox *et al.*，1979)

Fig. 5 (Na_2O+K_2O)−SiO_2 diagram of granite in the Yaodonggou area，Gansu (after Cox *et al.*，1979)

1—橄榄辉长岩；2—辉长岩；3—辉长闪长岩；4—闪长岩；5—花岗闪长岩；6—花岗岩；7—二长辉长岩；8—二长闪长岩；9—二长岩；10—石英二长岩；11—正长岩；12—似长辉长岩；13—似长二长闪长岩；14—似长正长闪长岩；15—似长正长岩；16—似长岩；A—碱性系列；S—亚碱性系列

1—olivine gabbro；2—gabbro；3—gabbro diorite；4—diorite；5—granodiorite；6—granite；7—monzogabbro；8—monzodiorite；9—monzonite；10—quartz-monzonite；11—syenite；12—foidites gabbro；13—foidites-monzodiorite；14—foidites-syenodiorite；15—foiditessyenite；16—foidites；A—alkaline series；S—subalkalic series

亚碱性花岗岩区域内，在 K_2O-SiO_2 图解(图6a)上，窑洞沟岩体在低钾拉斑玄武系列到中钾钙碱性系列区域内均有出现，在 A/NK−A/CNK 图解上(图6b)，均落入准铝质花岗岩区域内。

4.2 稀土元素

据表2可知，窑洞沟花岗岩的稀土元素总量(ΣREE)介于52.78×10^{-6} ~121.19×10^{-6}，其中，轻稀土元素(LREE)总量为43.84×10^{-6} ~92.34×10^{-6}，重稀土元素(HREE)总量为8.94×10^{-6} ~37.58×10^{-6}，轻重稀土元素间分馏明显，LREE/HREE=2.22 ~4.91，$(La/Yb)_N$ 值为6.92 ~11.74。轻稀土元素内部分馏较明显，其$(La/Sm)_N$ 值为3.34 ~5.09，重稀土元素内部分馏不明显，$(Gd/Yb)_N$ 值为1.35 ~1.52；在球粒陨石标准化的稀土元素配分图上表现出轻稀土元素富集的右倾型，具有轻微-中等的负 Eu 异常，δEu 介于0.67 ~0.81 之间(图7a)。

4.3 微量元素

据表2可知，窑洞沟岩体的大离子亲石元素(LILE)Rb、Sr、Ba 含量分别为14.00×10^{-6} ~74.20×10^{-6}、66.80×10^{-6} ~103×10^{-6}、87.90×10^{-6} ~612×10^{-6}，放射性生热元素(RPH)U、Th 含量分别为1.72×10^{-6} ~3.04×10^{-6}、5.51×10^{-6} ~11.30×10^{-6}，高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Hf含量分别为4.56×10^{-6} ~7.30×10^{-6}、0.38×10^{-6} ~0.56×10^{-6}、97×10^{-6} ~147×10^{-6}、2.67×10^{-6} ~4.17×10^{-6}。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图7b)上，普遍

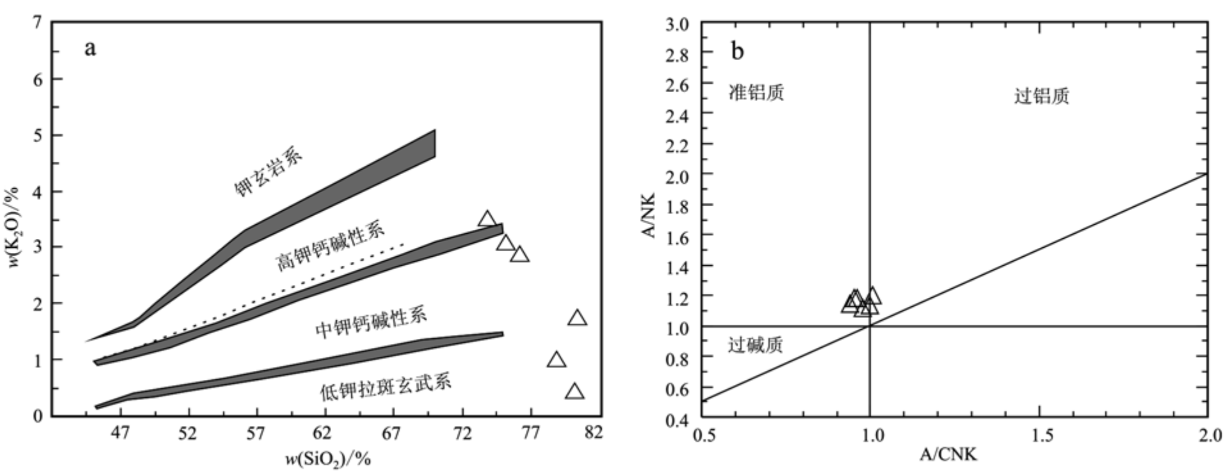

图6 窑洞沟岩体 K_2O-SiO_2 图(a，据 Rickwoo，1989)和 A/NK−A/CNK 图(b，据 Maniar and Piccolli，1989)

Fig. 6 K_2O versus SiO_2 diagram (a，after Rickwood，1989) and A/NK versus A/CNK diagram (b，after Maniar and Piccolli，1989) of granite in the Yaodonggou area，Gansu

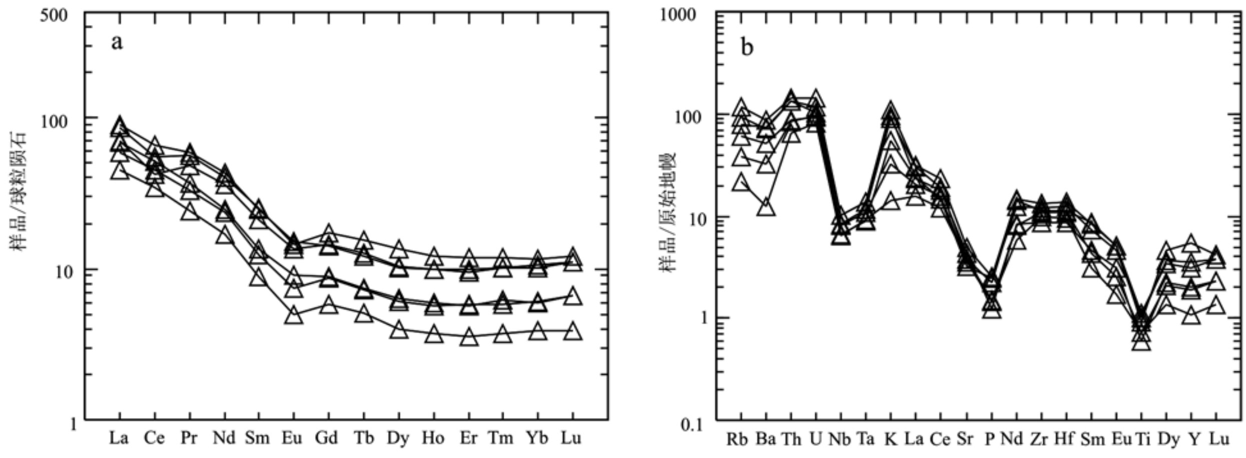

图 7　窑洞沟岩体稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7　REE patterns (a) and trace elements spidergrams (b) of granite in the Yaodonggou area, Gansu (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

表现出 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的亏损和 Rb、K、U 等元素的富集,显示出弧岩浆岩的特点。

5　岩石成因

花岗岩源区性质的判定及成因类型的划分一直是花岗岩研究工作中最重要的问题,目前被大家广泛接受的划分方案主要有 I、S、M、A 型 4 种(Pitcher, 1993; 吴福元等, 2007),其中,由于 M 型花岗岩多与蛇绿岩套相关,比较少见,因此,常见的花岗岩主要为 S 型、I 型和 A 型。窑洞沟花岗岩高硅、富碱、贫铝,SiO_2 含量介于 72.45% ~80.18%,ALK 介于 6.04 ~8.12,Al_2O_3 介于 10.3 ~13.82,类似于 A 型花岗岩,然而其 $10^4 \times Ga/Al = 1.41 \sim 1.73 < 2.6$,$Zr + Nb + Ce + Y = 142.64 \times 10^{-6} \sim 209.3 \times 10^{-6} < 350 \times 10^{-6}$,均低于 A 型花岗岩边界值(Whalen *et al.*, 1987; 吴福元等, 2007),从而排除为 A 型花岗岩的可能性。窑洞沟花岗岩体富铝矿物少见,A/CNK 介于 0.94 ~1.01,平均为 0.97,小于 1.0,为准铝质岩石,CIPW 标准矿物计算有 4 个样品不出现刚玉分子,两个有刚玉分子的样品(2017YT3-3H、2017YT3-6H)C 分子介于 0.031 ~0.264 之间,均小于 1,不具有 S 型花岗岩的特点(Chappell *et al.*, 1974, 1999)。实验岩石学研究表明,磷灰石在弱过铝质岩浆和准铝质岩浆中的溶解度很低,且与 SiO_2 的含量呈负相关关系;而在强过铝质岩浆中,磷灰石溶解度明显增高且与 SiO_2 的含量呈正相关关系或基本保持不变(Wolf and London, 1994),磷灰石在不同铝质岩浆中的这种独特的地球化学行为被成功地用于区分 S 型和 I 型花岗岩类(Chappell, 1999; Wu *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007)。在 $P_2O_5 - SiO_2$ 图解上(图 8a),二者具有较好的负相关性,显示出与 I 型花岗岩一致的变化趋势,这一趋势还能得到 Y - Rb 图解的支持,因为富 Y 矿物不会在准铝质 I 型岩浆演化的早期阶段结晶出来,从而引起分异的 I 型花岗岩的 Y 含量升高且与 Rb 含量呈正相关关系(Chappell, 1999; Li *et al.*, 2006; 李献华等, 2007),在 Rb - Y 图解上(图 8b),也表现出与分异 I 型花岗岩一致的趋势。窑洞沟花岗岩矿物组成上主要为石英和长石,暗色矿物极少,SiO_2 含量极高,P_2O_5、MgO、TiO_2、Fe_2O_3、FeO 含量极低,也有类似于高分异花岗岩的特征,然而,其 Nb/Ta 值为 12.00 ~13.28,平均为 12.68;Zr/Hf 比值为 34.28 ~38.36,平均为 36.19,又与高分异花岗岩具有较低的 Nb/Ta 及 Zr/Hf 比值不同(Bau, 1996; Dostal and Chatterjee, 2000; Linnen and Keppler, 2002; Claiborne *et al.*, 2006; Deering and Bachmann, 2010; Ballouard *et al.*, 2016; 吴福元等, 2017)。研究表明,高分异花岗岩具有极低的锆石 Zr/Hf 值,窑洞沟岩体锆石 Zr/Hf 值介于 29.79 ~37.01之间,平均 31.87,根据 Breiter 等(2014)划分方案(普通花岗岩的 Zr/Hf 值大于 55;中等分异花岗岩 Zr/Hf 值大于 25,小于 55;高分异花岗岩 Zr/Hf 值小于 25),窑洞沟岩体属于中等分异花岗岩。综上,认为窑洞沟花岗岩体属于中等分异的 I 型花岗岩,其初始岩浆在就位过程中可能经历了中等程度的分

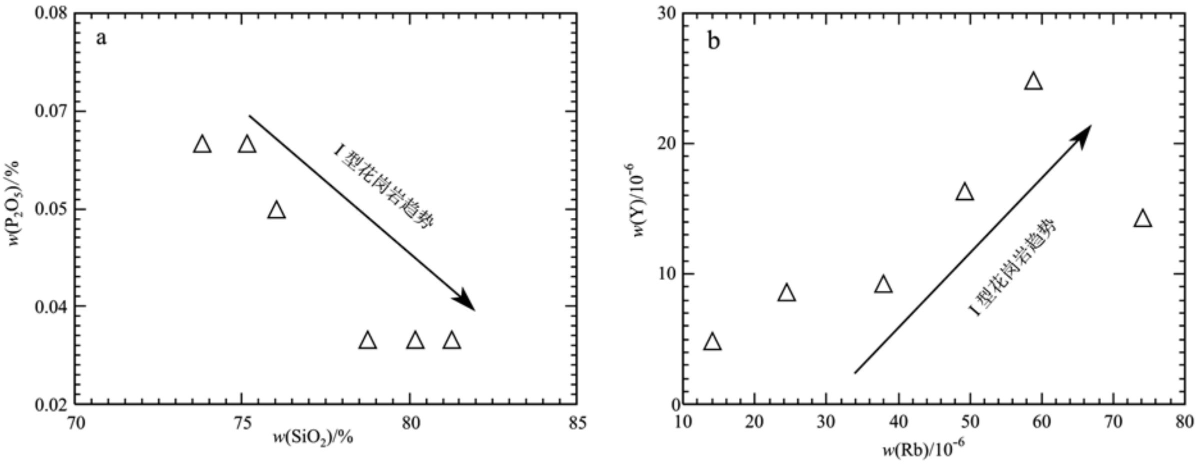

图8 窑洞沟岩体 $P_2O_5-SiO_2$ 图(a,据 Wolf and London,1994)和 Y－Rb 图(b,据 Li *et al.*, 2006)

Fig. 8 P_2O_5 versus SiO_2 diagram (a, after Wolf and London, 1994) and Y versus Rb diagram (b, after Li *et al.*, 2006) of granite in the Yaodonggou area, Gansu

离结晶作用。

6 动力学背景分析

区域构造研究表明,北祁连从早元古代中期开始,大陆岩石圈拉伸、减薄,并发生裂谷化(左国朝等, 1987; 夏林圻等, 1995, 2000; 葛肖虹等, 1999);至新元古代,裂谷作用进一步加强,发育以双峰式火山岩为特征的大陆裂谷火山作用;到晚寒武世,最终发生大陆裂解和分离,形成北祁连早古生代洋盆,于奥陶纪北祁连洋盆进入俯冲消减和弧后盆地协同演化阶段,发育大量岛弧和弧后盆地火山岩(左国朝等, 1987; 夏林圻等, 1991, 1992, 1995; 葛肖虹等, 1999; 张旗等, 2000; Xia *et al.*, 2003; 曾建元等, 2007; 夏小洪等, 2010; Song *et al.*, 2013),至445～424 Ma之间,洋盆闭合进入陆内碰撞和深俯冲过程(Xia *et al.*, 2003; 吴才来等, 2006; Zhang *et al.*, 2007; Song *et al.*, 2007a, 2007b, 2009a, 2009b)。窑洞沟岩体普遍表现出 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的亏损和 Rb、K、U 等元素的富集,显示出弧岩浆岩的特点,利用 Pearce 等(1984)微量元素构造判别图解,在 Nb－Y 构造环境判别图上(图9a),投影点主要位于火山弧到同碰撞花岗岩区域内,在Rb-(Y＋Nb)构造环境判别图上(图9b)

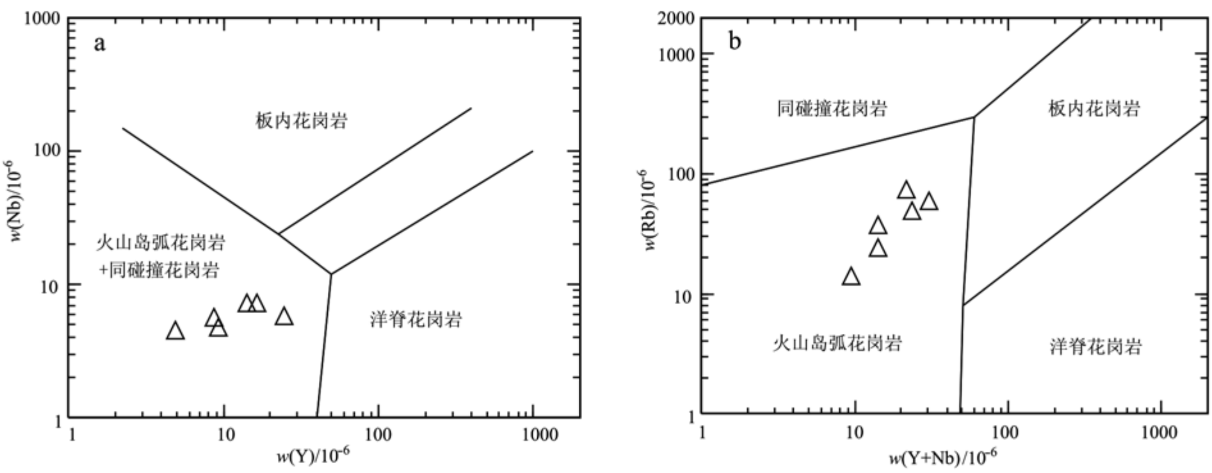

图9 窑洞沟岩体 Nb－Y 图(a)和 Rb－(Y＋Nb)构造环境判别图(b)(底图据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 9 Nb versus Y diagram (a) and Rb versus Y＋Nb diagram (b) of granite in the Yaodonggou area, Gansu (after Pearce *et al.*, 1984)

主要位于火山弧区域内。结合本区最新获得的窑洞沟岩体的高精度年代学数据(466 Ma)及其所处的大地构造位置,本文认为窑洞沟岩体的形成可能与北祁连洋盆持续的向北俯冲,导致弧后拉张伸展,诱发幔源岩浆岩底侵上升,底侵的幔源岩浆提供热量,导致古老地壳物质熔融形成初始岩浆,而后经历了中等程度分离结晶作用有关。其岩浆具有岛弧岩浆属性,可能是由于弧后盆地是在岛弧的基础上裂开的或者其岩浆源区受到了俯冲板片流体/熔体的改造作用。

7 结论

(1) 花岗岩的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 466 ±2 Ma,MSWD =0.13,代表其结晶年龄,这为北祁连造山带早古生代岩浆活动事件提供了一个可靠年代学约束。

(2) 窑洞沟岩体具有高硅、低钾、低磷含量特征,铝饱和指数(A/CNK)为 0.94 ~1.01,富集 Rb、Th、U,明显亏损 Nb、Ta、Sr、Ti、P 和 Eu 等元素,属准铝质中等分异 I 型花岗岩。

(3) 窑洞沟岩体的形成可能与北祁连洋盆持续向北俯冲导致弧后拉张伸展,诱发幔源岩浆岩底侵上升,底侵的幔源岩浆提供热量,导致古老地壳物质熔融形成初始岩浆,而后经历中等程度分离结晶作用有关。其岩浆具有岛弧岩浆属性,可能是由于弧后盆地在岛弧的基础上裂开或者其岩浆源区受到了俯冲板片流体/熔体的改造作用。

致谢 感谢项目组成员在野外工作中的帮助和支持,感谢西安地质调查中心实验测试中心和西北大学大陆动力学国家重点实验室在主微量元素分析、锆石 U-Pb 同位素测定中的帮助及审稿人的宝贵修改意见。

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb[J]. Chemical Geology, 192: 59 ~79.

Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, *et al*. 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition[J]. Geology, 44: 231 ~234.

Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 123: 323 ~333.

Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al*. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143: 602 ~622.

Breiter K, Lamarão C N, Borges R M K, *et al*. 2014. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites[J]. Lithos, 192 ~195: 208 ~225.

Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 46 (3): 535 ~551.

Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geol., 8: 173 ~174.

Claesson S, Vetrin V, Bayanova T, *et al*. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic[J]. Lithos, 51: 95 ~108.

Claiborne L L, Miller C F, Walker B A, *et al*. 2006. Tracking magmatic processes through Zr/Hf ratios in rocks and Hf and Ti zoning in zircons: An example from the Spirit Mountain batholith, Nevada[J]. Mineral. Mag., 70: 517 ~543.

Cowgill E, Yin A, Harrison T M, *et al*. 2003. Reconstruction of the Altyn Tagh fault based on U-Pb Geo-chronology: role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in Forming the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 108(B7): 457 ~470.

Cox K G, Bell J D and Pankhurst R J. 1979. The Interpretation of Igneous Rocks[M]. George, Allen and Unwin, London, 115 ~120.

Deering C D and Bachmann O. 2010. Trace element indicators of crystal accumulation in silicic igneous rocks[J]. Earth Planet Sci. Lett., 297: 324 ~331.

Dostal J and Chatterjee A K. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada)[J]. Chem. Geol., 163: 207 ~218.

Du Yuansheng, Zhang Zhe, Zhou Daohua, *et al*. 2002. Silurian and Devonian palaeogeography of northern Qilian-Hexi corridor and its sedimentary response to synorogenesis of North Qilian orogenic belt[J]. Journal of Palaeogeography, 4(4): 1 ~8(in Chinese with English abstract).

Du Yuansheng, Zhu Jie, Han Xin, *et al*. 2004. From the back-arc basin to foreland basin—Ordovician-Devonian sedimentary basin and tectonic evolution in the North Qilian orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 23(10): 92 ~98.

Feng Yimin. 1997. Investigatory summary of the Qilian Orogenic Belt, China: History, presence and prospect[J]. Advance in Earth Sciences, 12(4): 307~314(in Chinese with English abstract).

Feng Yimin and He Shiping. 1996. Geotectonics and Orogeny of the Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).

Feng Yimin and Wu Hanquan. 1992. Tectonic evolution of North Qilian Mountains and its neighbour- hood since Paleozoic[J]. Northwest Geoscience, 13(2): 61~74(in Chinese with English abstract).

Ge Xiaohong and Liu Junlai. 1999. Formation and tectonic background of the northern Qilian orogenic belt[J]. Earth Science Frontiers, 6(4): 223~230(in Chinese with English abstract).

Gehrels G E and Yin A. 2003. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysi cal Research, 108 (B9): 2 423.

Gehrels G E, Yin A and Wang X. 2003. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 115(7): 881~896.

Li Chunyu, Wang Quan, Zhang Zhimeng, *et al*. 1980. A preliminary study of plate tectonics of China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 2(1): 11~22(in Chinese with English abstract).

Li Xianhua, Li Zhengxiang and Li Wuxian. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 52(14): 1 873~1 885.

Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, *et al*. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I-and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab[J]. Lithos, 96(1): 186~204.

Li Xianhua, Li Zhengxiang, Sinclair J A, *et al*. 2006. Revisiting the "Yanbian Terrane": Implications for Neoproterozic tectonic evolution of the western Yangtze, South China[J]. Precambrian Reserch, 151(1~2): 14~30.

Lin Yihui, Zhang Lifei, Ji Jianqing, *et al*. 2010. $^{40}Ar/^{39}Ar$ isochron ages of lawsonite blueschists from Jiuquan in the northern Qilian Mountain, NW China, and their tectonic implications[J]. Chinese Science Bulletin, 55(19): 2 021~2 027.

Linnen R L and Keppler H. 2002. Melt composition control of Zr/Hf fractionation in magmatic processes[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 66: 3 293~3 301.

Luding K R. 2003. ISOPLOT3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel[J]. Berkeley Geo-chronology Center Special Publication, 4: 1~70.

Ma Changqian, Yang Kunguang, Ming, *et al*. 2004. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites[J]. Science in China(Series D), 47(5): 453~462.

Maniar P D and Piccolli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoid [J]. Geological Society of America Bulletin, 101: 635~643 .

Mo Xuanxue. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. Geological Journal of China Universities, 17 (3): 351 ~ 367(in Chinese with English abstract).

Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 25: 956~983.

Pitcher W S. 1993. The Nature and Origin of Granite[M]. Blackie Academic and Professional, London, 1~321.

Qin Haipeng. 2012. Petrological Characteristics of Early Paleozoic Granites in the North Qilian Orogenic Belt and Their Relationship with Tectonic Evolution[D]. Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).

Qin Haipeng, Wu Cailai, Wang Cisong, *et al*. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb characteristical of Xiagucheng granite in North Qilian[J]. Acta Geol. Sin., 88(10): 1 832~1 842(in Chinese with English abstract).

Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and mi-nor elements[J]. Lithos, 22: 247~263.

Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai, *et al*. 2004. Island arc volcanic rocks in the North Qaidam UHP metamorphic belt[J]. Acta Geol. Sin., 78: 52~64(in Chinese with English abstract).

Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, *et al*. 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 23(4): 1 378~1 401.

Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, *et al*. 2009a. Tectonic evolution of Early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. Journal of Asian Earth Science, 35(3~4): 334~353.

Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, *et al*. 2009b. The Luliangshan garnet peridotite massif of the North Qaidam UHPM belt, NW China-a review of its origin and metamorphic evolution[J]. Journal of Metamorphic Geology, 27(9): 621~638.

Song Shuguang, Su Li, Niu Yaoling, *et al*. 2007b. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet Peridotite in the North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, northwestern China [J]. Lithos, 96(1~2): 243~265.

Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, *et al*. 2004a. Zircon U-Pb SHRIMP ages of eclogites from the North Qilian Mountains in NW

China and their tectonic implication[J]. Chinese Science Bulletin, 49(8): 848～852.

Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, *et al*. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology, 47(3): 435～455.

Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, *et al*. 2007a. Eclogite and carpholite bearing meta- sedimentary rocks in the North Qilian suture zone, NW China: Implications for Early Paleozoic cold oceanic subduction and water transport into mantle[J]. Journal of Metamorphic Geology, 25(5): 547～563.

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. London, Geological Society Special Publication.

Tseng C Y, Zuo Guochao, Yang Huaijie, *et al*. 2009. Occurrence of Alaskan-type mafic-ultramafic intrusions in the North Qilian Mountains, northwest China: Evidence of Cambrian arc magmatism on the Qilian Block[J]. Island Arcs, 18(3): 526～549.

Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407～419.

Wolf M B and London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58 (19): 4 127～4 245.

Wu Cailai, Xu Xueyi, Gao Qianming, *et al*. 2010. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China[J]. Acta Petrol. Sin., 26: 1 027～1 044(in Chinese with English abstract).

Wu Cailai, Yang Jingsui and Yang Hongyi. 2004. Two types of I-type granite dating and geological significance from North Qilian, NW China[J]. Acta Petrol. Sin., 20(3): 425～432 (in Chinese with Enmglish abstract).

Wu Cailai, Yao Shangzhi, Yang Jingsui, *et al*. 2006. Doubel subduction of the Early Paleozoic North Qilian oceanic plate: Evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China[J]. Geology in China, 33(6): 1 197～1 208(in Chinese with English abstract).

Wu Fuyuan, Jahn B M, Wilder S A, *et al*. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis[J]. Lithos, 66(3～4): 241～273.

Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al*. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1 217～1 238(in Chinese with English abstract).

Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, *et al*. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. Science China Earth Sciences, 60: 1 201～1 219.

Wu Hanquan, Feng Yimin, Song Shuguang, *et al*. 1993. Metamorphism and deformation of Blueschist Belts and their tectonic implications, North Qilian Moutains, China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 11(4): 523～536.

Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1 554～1 569.

Xia Linqi, Li Xiangmin, Yu Jiyuan, *et al*. 2016. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain [J]. Geology in China, 43(4): 1 087～1 138(in Chinese).

Xia Linqi, Xia Zuchun, Peng Ligui, *et al*. 1991. Determination of nature of Ordovician island-arc volcanic series at Shihuigou area from Northern Qilian Mountains[J]. Acta Petrol. Mineral., 10(1): 1～10(in Chinese).

Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, *et al*. 1992. Marine Volcanic Rocks from Qilian and Qinling Mountains[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).

Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, *et al*. 2001. Tectonics-Volcanic Magmatism- Mineralization Dynamics of North Qilian Mountains [M]. Beijing: China Land Press(in Chinese).

Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1995. Dynamics of tectono-volcanomagmatic evolution from North Qilian Mountains, China[J]. Northwest Geoscience, 16(1): 1～28(in Chinese with English abstract).

Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1996. Petrogenesis of Marine Volcanic Rocks from Northern Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1998. Early Palaeozoic mid-ocean ridgeocean island and back-arc basin volcanism in the North Qilian Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 72(4): 301～312(in Chinese with English abstract).

Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 2003. Magmagenesis in the Ordovician back-arc basins of the northern Qilian Mountain, China[J]. Geological Society of America Bulletin, 115(12): 1 510～1 522.

Xia Linqi, Xia Zuchun, Zhao Jiangtian, *et al*. 2000. Determination of the metamorphic basalts of the Proterozoic continent in the western segment of the Northern Qilian Mountains[J]. Science in China: Series D, 30(1): 1～8(in Chinese).

Xia Xiaohong and Song Shuguang. 2010. Forming age and tectono-petrogenises of the Jiugequan ophiolite in the North Qilian Mountain, NW China[J]. Chinese Science Bulletin, 55(18): 1 899～1 907.

Xiang Zhenqun, Lu Songnian, Li Huaikun, *et al*. 2007. SHRIMP U-Pb zircom age of gabbro in Aoyougou in the western segment of the North Qilian Mountains，China and its geological implications[J]. Geol. Bull. China，26：1 686～1 691(in Chinese).

Xiao Wenjiao，Windley B F，Yong Y，*et al*. 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple- accretionary model for the Qilian Shan，NW China [J]. Asian Earth Science，35(3～4)：323～333.

Xiong Ziliang，Zhang Hongfei and Zhang Jie. 2012. Petrogenesis and tectonic implications of the Maozangsi and Huangyanghe granitic intrusionsin Lenglongling area，the eastern part of North Qilian Mountains，NW China[J]. Earth Science Frontiers，19(3)：214～227.

Xu Xueyi，Wang Hongliang，Chen Junlu，*et al*. 2008. Zircon U-Pb dating and petrogenesis of Xinglongshan Group basic volcanic rocks at eastern segment of Middle Qilian Mts[J]. Acta Petrol. Sin.，24(4)：827～840(in Chinese with English abstract).

Xu Zhiqin，Xu Huifen，Zhang Jianxin，*et al*. 1994. The Zhoulangnanshan Caledonian subduction complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics[J]. Acta Geol. Sin.，68(1)：1～15(in Chinese with English abstract).

Xu Zhiqin，Yang Jingsui，Wu Cailai，*et al*. 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahighpressure metamorphic belt[J]. Asian Earth Science，28(2～3)：160～173.

Yan Zhen，Xiao Wenjiao，Windley B F，*et al*. 2010. Silurian clastic sediments in the North Qilian Shan，NW China：Chemical and isotopic constraints on their forearc provenance with implications for the Paleozoic evolutionof the Tibetan Plateau[J]. Sedimentary Geology，231：98～114.

Yang Jingsui，Xu Zhiqin，Li Haibing，*et al*. 1998. The eclogites have been found in the northern Qaidam Basin，Western China[J]. Science in Bulletin，43(14)：1 544～1 549(in Chinese with English abstract).

Yang Jingsui，Xu Zhiqin，Zhang Jianxin，*et al*. 2002. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model[J]. Terra Nova，14(5)：397～404.

Yin An，Manning C E，Lovera O，*et al*. 2007. Early Paleozoic tectonic and thermomechanical evolution of ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic rocks in the Northern Tibetan Plateau，Northwest China[J]. International Geology Review，49(8)：681～716.

Zeng Jianyuan，Yang Huairen，Yang Hongyi，*et al*. 2007. The Dongcaohe ophiolite from the North Qilian Mountains：A fossil oceanic crust of the Paleo-Qilian ocean[J]. Chinese Science Bulletin，52(17)：2 390～2 401.

Zhang J X，Li J P，Yu S Y，*et al*. 2012. Provenance of eclogitic metasediments in the north Qilian HP/LT metamorphic terrane，western China：Geodynamic implications for early Paleozoic subduction- erosion[J]. Tectonophysics，57(11)：78～101.

Zhang Jianxin，Meng Fancong，Wan Yusheng，*et al*. 2007. A cold Early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains. NW China：Petrological and U-Pb geochronological cons- traints[J]. Journal of Metamorphic Geology，25(3)：285～304.

Zhang Jianxin，Xu Zhiqin，Chen Wen，*et al*. 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain[J]. Acta Petrologica et Mineralogica，16(2)：112～119(in Chinese with English abstract).

Zhang Jianxin，Xu Zhiqin，Xu Huifen，*et al*. 1998. Frame work of north Qilian Caledonian subduction accretionary wedge and its deformation dynamics[J]. Scientia Geologica Sinica，41(3)：290～299(in Chinese with English abstract).

Zhang Qi，Wang Yan and Qian Qing. 2000. The North Qilian ocean basin of the Early Paleozoic age-An aulacogen or a large oceanic basin：A discussion with Ge Xianhong[J]. Scientia Geologica，35(1)：121～128(in Chinese with English abstract).

Zhang Zhaochong，Zhou Meifu，Robinson P T，*et al*. 2001. SHRIMP dating of the Aoyougou ophiolite in the west sector of the North Qilian Mountains and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica，17(2)：222～226(in Chinese with English abstract).

Zhou Dejin，Chen Yu，Zhang Qi，*et al*. 1997. The finding of Alaskatype mafic- ultramafic complex from Qilian County and constraints on Qilian Mountain tectonic evolusion[J]. Sci. Geol. Sin.，32(1)：122～127(in Chinese).

Zuo Guochao and Liu Jichen. 1987. The evolution of tectonics of Early Paleozoic in North Qilian Range，China[J]. Sci. Geol. Sin.，30(1)：14～24(in Chinese).

Zuo Guochao and Wu Hanquan. 1997. A bisubduction-collision orogenic model of early- Paleozoic in the middle part of North Qilian area[J]. Advance in Earth Science，12(4)：315～323(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

杜远生，张 哲，周道华，等. 2002. 北祁连-河西走廊志留纪和泥盆纪古地理及其同造山过程的沉积响应[J]. 古地理学报，4(4)：1～8.

杜远生，朱 杰，韩 欣，等. 2004. 从后盆地到前陆盆地-北祁连造山带奥陶纪-泥盆纪的沉积盆地与构造演化[J]. 地质通报，23(10)：92～98.

冯益民. 1997. 祁连山造山带研究概况——历史、现状及展望[J]. 地球科学进展，12(4)：307～314.

冯益民，何世平. 1996. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京：地质出版社.

冯益民，吴汉泉. 1992. 北祁连山及其邻区古生代以来大地构造演化初探[J]. 西北地质科学，13(2)：61～74.

葛肖虹，刘俊来. 1999. 北祁连造山带的形成与背景[J]. 地学前缘，6(4)：223～230.

李春昱，王　荃，张之孟，等. 1980. 中国板块构造轮廓[J]. 中国地质科学院院报，2：11～22.

李献华，李武显，李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报，52(9)：981～992.

林宜慧，张立飞，季建清，等. 2010. 北祁连山九个泉硬柱石蓝片岩^{40}Ar-^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 科学通报，55(17)：1 710.

莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报，17(3)：351～367.

秦海鹏. 2012. 北祁连造山带早古生代花岗岩岩石学特征及其与构造演化的关系[D]. 中国地质科学院.

秦海鹏，吴才来，王次松，等. 2014. 北祁连下古城花岗岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及岩石化学特征[J]. 地质学报，88(10)：1 832～1 842.

史仁灯，杨经绥，吴才来，等. 2004. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据[J]. 地质学报，78(5)：649～657.

吴才来，徐学义，高前明，等. 2010. 北祁连早古生代花岗质岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报，26(4)：1 027～1 044.

吴才来，杨经绥，杨宏仪，等. 2004. 北祁连东部两类 I 型花岗岩定年及其地质意义[J]. 岩石学报，20(3)：425～432.

吴才来，姚尚志，杨经绥，等. 2006. 北祁连洋早古生代双向俯冲的花岗岩证据[J]. 中国地质，33(6)：1 197～1 208.

吴福元，李献华，杨进辉，等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报，23(6)：1 217～1 238.

吴福元，刘小池，纪伟强，等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学：地球科学，47(7)：745～765.

吴元保，郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报，49(16)：1 589～1 604.

夏林圻，李向民，余吉远，等. 2016. 祁连山新元古代中-晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质，43(4)：1 087～1 138.

夏林圻，夏祖春，彭礼贵，等. 1991. 北祁连山石灰沟奥陶纪岛弧火山岩系岩浆性质的确定[J]. 岩石矿物学杂志，10(1)：1～10.

夏林圻，夏祖春，任有祥，等. 1992. 祁连、秦岭山系海相火山岩[M]. 武汉：中国地质大学出版社.

夏林圻，夏祖春，任有祥，等. 2001. 北祁连山构造-火山岩浆-成矿动力学[M]. 北京：中国大地出版社.

夏林圻，夏祖春，徐学义. 1995. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学[J]. 西北地质科学，16(1)：1～28.

夏林圻，夏祖春，徐学义. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京：地质出版社.

夏林圻，夏祖春，徐学义. 1998. 北祁连早古生代洋脊、洋岛和弧后盆地火山作用[J]. 地质学报，72(4)：301～312.

夏林圻，夏祖春，赵江天，等. 2000. 北祁连山西段元古宙大陆溢流玄武岩性质的确定[J]. 中国科学：地球科学，30(1)：1～8.

夏小洪，宋述光. 2010. 北祁连山肃南九个泉蛇绿岩形成年龄和构造环境[J]. 科学通报，55(15)：1 465～1 473.

相振群，陆松年，李怀坤，等. 2007. 北祁连西段熬油沟辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质通报，26(12)：1 686～1 691.

徐学义，王洪亮，陈隽璐，等. 2008. 中祁连东段兴隆山群基性火山岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究[J]. 岩石学报，24(4)：827～840.

许志琴，徐惠芬，张建新，等. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J]. 地质学报，68(1)：1～15.

熊子良，张宏飞，张　杰. 2012. 北祁连东段冷龙岭地区毛藏寺岩体和黄羊河岩体的岩石成因及其构造意义[J]. 地学前缘，19(3)：214～227.

杨经绥，许志琴，李海兵，等. 1998. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J]. 科学通报，43(14)：1 544～1 549.

曾建元，杨怀仁，杨宏仪，等. 2007. 北祁连东草河蛇绿岩：一个早古生代的洋壳残片[J]. 科学通报，52(7)：825～835.

张建新，许志琴，陈　文，等. 1997. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. 岩石矿物学杂志，16(2)：112～119.

张建新，许志琴，徐惠芬，等. 1998. 北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学[J]. 地质科学，41(3)：290～299.

张　旗，王　焰，钱　青. 2000. 北祁连早古生代洋盆是裂陷槽还是大洋盆——与葛肖虹讨论[J]. 地质科学，35(1)：121～128.

张　旗，周国庆，王　焰. 2003. 中国蛇绿岩的分布、时代及形成环境[J]. 岩石学报，19(1)：1～8.

张招崇，周美付，Paul T，等. 2001. 北祁连山西段熬油沟蛇绿岩 SHRIMP 分析结果及其地质意义[J]. 岩石学报，17(2)：222～226.

周德进，陈　雨，张　旗，等. 1997. 北祁连山南侧阿拉斯加型岩体的发现及地质意义[J]. 地质科学，32(1)：122～127.

左国朝，刘寄陈. 1987. 北祁连早古生代大地构造演化[J]. 地质科学，30(1)：14～24.

左国朝，吴汉泉. 1997. 北祁连山中段早古生代双向俯冲-碰撞造山模式剖析[J]. 地球科学进展，12(4)：315～323.