

doi: 10.12029/gc20220218

张金明,王秉璋,薛万文,付彦文,田成秀,雷晓清. 2022. 柴北缘胜利口东地区白云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素[J]. 中国地质, 49(2): 620-630.

Zhang Jinming, Wang Bingzhang, Xue Wanwen, Fu Yanwen, Tian Chengxiu, Lei Xiaoqing. 2022. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopes of Shenglikou muscovite monzogranite in northern margin of Qaidam Basin[J]. Geology in China, 49(2): 620-630(in Chinese with English abstract).

柴北缘胜利口东地区白云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素

张金明,王秉璋,薛万文,付彦文,田成秀,雷晓清

(青海省地质调查院/青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室,青海 西宁 810012)

提要:【研究目的】柴北缘地区分布着大量早古生代花岗岩,是否存在与大陆深俯冲和早期碰撞阶段的岩浆活动,截至目前研究资料较少,制约了对柴北缘地区大地构造背景演化的认识。【研究方法】本文对胜利口东地区白云母二长花岗岩进行锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及 Hf 同位素研究。【研究结果】通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年,获得白云母二长花岗岩的年龄为 (433 ± 1.6) Ma (MSWD=0.026), 属中志留世岩浆活动的产物。岩石地球化学特征显示岩石具富硅 ($\text{SiO}_2=76.33\% \sim 76.99\%$) 和碱 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.28\% \sim 8.19\%$), 高 K_2O 的特征, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, 低镁 ($\text{MgO}=0.21\% \sim 0.29\%$) 和 $\text{Mg}^\#$ 值 ($\text{Mg}^\#=23.29 \sim 30.17$), A/CNK 介于 1.12 ~ 1.19, 属强过铝质钙碱性岩石系列。岩石相对富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素及 Ba、Sr 等部分大离子亲石元素。稀土元素配分曲线呈右倾型, 显示明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.32 \sim 0.63$)。锆石 Hf 同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 比值为 $-5.2 \sim -16.0$, 对应的 Hf 同位素地壳模式年龄 T_{DM2} 为 1.86 ~ 2.20 Ga。【结论】综合岩石地球化学及同位素的研究表明, 胜利口东白云母二长花岗岩为 S 型花岗岩, 源于古元古代地壳物质的重熔再造。在综合对比白云母二长花岗岩形成年龄与区域高压-超高压变质时代的基础上, 结合岩石地球化学及同位素的研究认为, 胜利口东白云母二长花岗岩形成于柴北缘高压-超高压变质带碰撞阶段。

关键词:柴北缘;胜利口东;锆石 U-Pb 年龄;锆石 Hf 同位素;地质调查工程

创 新 点:胜利口东白云母二长花岗岩形成年龄为 (433 ± 1.6) Ma 与柴北缘高压-超高压变质带的峰期变质时代一致, 说明柴北缘高压-超高压带碰撞时期有微弱岩浆活动发生, 也进一步证明了柴北缘碰撞造山作用发生的时代。

中图分类号: P597; P588.12¹ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0620-11

Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopes of Shenglikou muscovite monzogranite in northern margin of Qaidam Basin

ZHANG Jinming, WANG Bingzhang, XUE Wanwen, FU Yanwen, TIAN Chengxiu, LEI Xiaoqing

(Qinghai Institute of Geological Survey/Qinghai Province Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources of Northern Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810012, Qinghai, China)

收稿日期: 2019-10-16; 改回日期: 2020-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41762006)及青海学者专项(QHS201802)共同资助。

作者简介: 张金明, 男, 1982 年生, 硕士, 矿物学、岩石学专业; E-mail: 271883992@qq.com。

通讯作者: 王秉璋, 男, 1969 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事区域地质调查研究; E-mail: wbz6901@126.com。

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] There are a large number of early Paleozoic granites distributed in the northern margin of Qaidam Basin. However, there are few research data on the existence of magmatic activities in the stage of deep subduction and early collision with the continent, which restricts the understanding of the tectonic background evolution in the northern margin of Qaidam Basin. **[Methods]** Zircon U-Pb geochronology, petrochemistry and Hf isotope of muscovite monzogranite in the east of Shenglikou are studied. **[Results]** LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the age of muscovite monzogranite is (433 ± 6) Ma (MSWD = 0.026), which is the product of middle Silurian magmatism. Geochemical characteristics show that the rocks are rich in silicon ($\text{SiO}_2=76.33\%-76.99\%$) and alkali ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.28\%-8.19\%$), high K_2O , $\text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O} > 1$, low Mg ($\text{MgO}=0.21\%-0.29\%$) and $\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}^\#=23.29-30.17$), A/CNK(1.12-1.19), belonging to the strongly peraluminous calc alkaline rock series. The rocks are relatively enriched in Rb, Th, U and other large ion lithophile elements, and depleted in Nb, Ta, Ti, P and some Ba, Sr and other large ion lithophile elements (LILE). The REE distribution curve is right dipping, showing obvious negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.32-0.63$). Hf isotope of zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -5.2 - -16.0$, and the corresponding Hf isotopic crustal model ages $T_{\text{DM2}}=1.86-2.20$ Ga. **[Conclusions]** The study of geochemistry and isotope shows that the muscovite monzogranite is S-type granite, which originated from the remelting and reconstruction of Paleoproterozoic crust. Based on the comprehensive comparison of the formation age of muscovite monzogranite and the regional high-pressure ultra-high pressure metamorphic age, combined with the study of petrochemistry and isotope, it is considered that the muscovite monzogranite in the east of Shenglikou was formed in the collision stage of the high-pressure ultra-high pressure metamorphic belt in the northern margin of Qaidam Basin.

Key words: northern margin of Qaidam Basin; East Shenglikou; zircon U-Pb dating; zircon Hf isotopic composition; geological survey engineering

Highlights: The age of muscovite monzogranite in the eastern Shenglikou area is (433 ± 1.6) Ma, which is consistent with the peak metamorphic age of HP-UHP metamorphic belt in the northern Qaidam basin, indicating that there was weak magmatic activity during the HP-UHP belt collision in the northern Qaidam basin, which further proves the age of collisional orogenesis in the northern Qaidam Basin.

About the first author: ZHANG Jinming, male, born in 1982, master, majors in mineralogy and petrology; E-mail: 271883992@qq.com.

About the corresponding author: WANG Bingzhang, male, born in 1969, doctor, senior engineer, mainly engaged in regional geology; E-mail: wbz6901@126.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41762006), program of Qinghai Scholars (No. QHS201802)

1 引言

柴北缘构造带位于青藏高原北部,其北部以青海南山断裂为界与祁连地块相邻,南部和柴达木地块被柴达木北缘断裂所分割,东部以哇洪山—温泉断裂为界,西北以阿尔金断裂为界,以元古宙和早古生代变质作用、岩浆活动广泛发育为特征(李怀坤,2003;陆松年,2004)(图1a)。20世纪90年代在柴北缘地区发现榴辉岩,后续发现超高压变质矿物——金刚石、柯石英,确立了柴北缘为中国又一条高压—超高压变质带(杨经绥,1998,2000,2001;宋述光,2001,2011),这引起了人们对本地区早古生代构造背景的广泛关注。沿祁连地块南缘以及柴北缘高压—超高压变质带分布有大量的早古生代花

岗岩,为了揭示洋、陆壳深俯冲—碰撞过程中的岩浆响应事件及柴北缘构造带的形成与演化,前人已对这些花岗岩开展了大量的年代学、地球化学和成因等方面的研究工作(吴才来,2004,2008,2014;孟繁聪,2005;卢欣祥,2007;周宾,2013;朱小辉,2013;Zhong,2019)。依据研究的相关成果将区内早古生代花岗岩类划分为3个阶段:晚寒武世—早—中奥陶世俯冲型、晚奥陶世同碰撞型、早志留世—早泥盆世碰撞后拉伸型(吴才来,2008;张延军,2016)。是否存在与大陆深俯冲和早期碰撞阶段的岩浆活动?截止目前研究资料较少,制约了对柴北缘地区大地构造背景演化的认识。

本次笔者在柴北缘俯冲碰撞杂岩带胜利口东榴辉岩分布区发现了少量呈岩株状产出的白云母

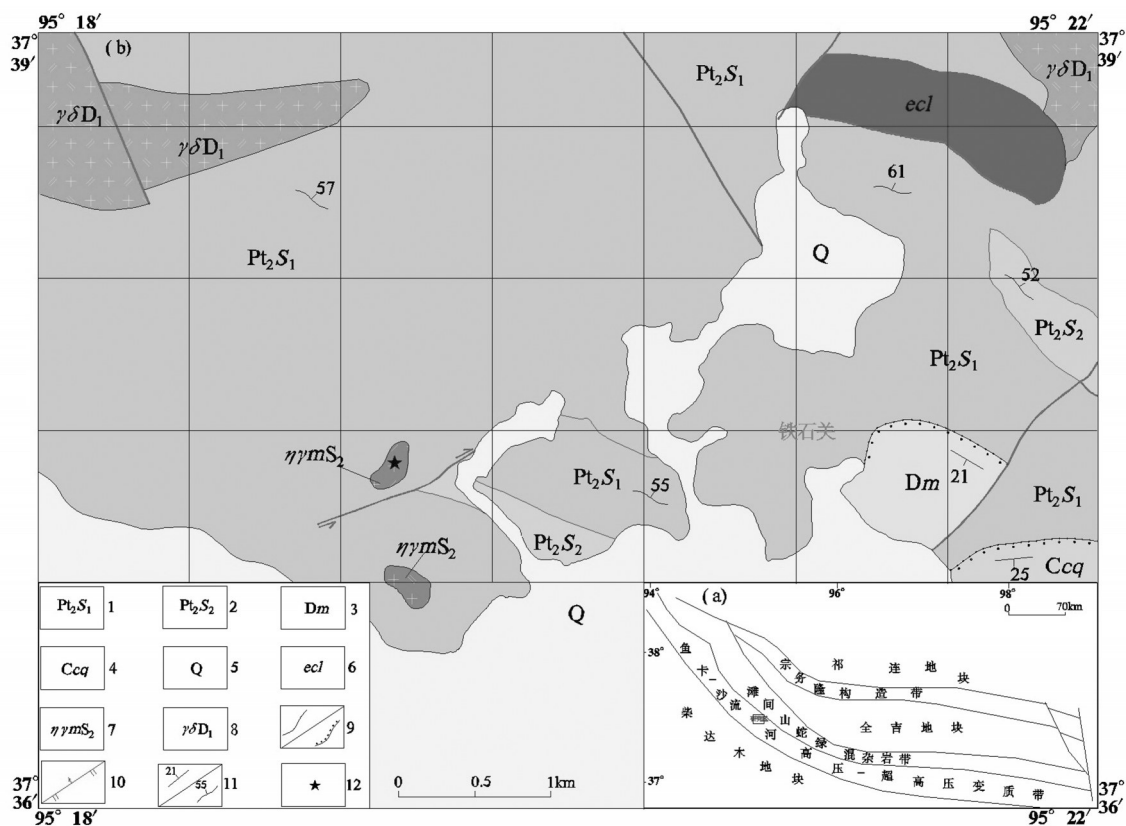


图1大地构造位置图(a)和胜利口东地区区域地质图(b)(据青海省地质调查院,2003)

1—沙流河岩群片岩—片麻岩组;2—沙流河岩群斜长角闪岩组;3—牦牛山组;4—城墙沟组;5—第四系;6—榴辉岩;7—中志留世白云母二长花岗岩;8—早泥盆世花岗闪长岩;9—地质界线/角度不整合界线;10—断层界线;11—层理产状/片理产状;12—取样位置

Fig.1 Tectonic map (a) and geological map of Shenglikoudong area (b) (after Qinghai Institute of Geological Survey, 2003)

1—Shaliuhe Group schist gneiss formation; 2—Shaliuhe rock Group amphibolite formation; 3—Maoniushan Elashan Formation; 4—Chengqianggou Elashan Formation; 5—Quaternary; 6—Eclogite; 7—Middle Silurian muscovite monzogranite; 8—Early Devonian granodiorite; 9—Geological boundary/ angular unconformity boundary; 10—Fault; 11— Occurrence; 12—Sampling location

二长花岗岩,对锆石进行原位U-Pb定年和Hf同位素分析,并结合其地球化学特征,探讨白云母二长花岗岩的源区性质和形成的构造环境,在此基础上,为进一步探讨柴北缘地区早古生代构造演化历史提供重要约束。

2 地质背景及岩石特征

2.1 地质背景

胜利口东地区地理上位于柴达木盆地北缘绿梁山的东段。区域构造位置在柴达木地块北缘,处于南祁连地块与柴达木地块的拼合部位。随着近几年榴辉岩组合的相继发现和确定,柴北缘构造带被公认是一个陆块之间的俯冲碰撞带。出露的地层:前寒武系是一套含榴辉岩透镜体的中—高级变质岩系,陆松年等(2002)对达肯达坂再厘定时将这

套与榴辉岩共生的表壳岩系划分为中元古代沙流河岩群,但其中可能含有古元古代达肯达坂岩群的物质组成。晚古生代地层则发育泥盆系和石炭系,是一套陆相粗碎屑岩、火山岩及海陆交互的碎屑岩沉积。此外,还有少量的第四系(图1b)。

沙流河岩群为一套层状无序的中—高级变质岩系,可大致划分为片岩—片麻岩组和斜长角闪岩组;片麻岩、片岩主要岩性组合为二云石英片岩、条带状石英片岩、条带状石英岩、黑云斜长片麻岩、二云斜长片麻岩、条带状大理岩等,为一套成熟度较高的陆源碎屑岩—碳酸盐岩组成的正常沉积建造;斜长角闪岩岩组出露面积较小,主要岩性有斜长角闪岩、石榴绿帘角闪岩、石榴石斜长角闪岩和少量角闪斜长片麻岩,其原岩可能是一套变质基性火山岩建造;超高压变质岩石主要产在沙流河岩群中,

呈不同规模、大小的透镜体产出,与围岩呈构造接触,主要岩石类型有榴辉岩、榴闪岩组成。泥盆纪牦牛山组不整合于沙柳河群之上,由碎屑岩和火山岩组成。石炭纪城墙沟组有少量出露,岩性单一,为深灰色厚层灰岩,富产珊瑚、腕足、筴等化石;与下伏的中元古界片麻岩或片岩呈角度不整合接触关系。侵入岩分布在研究区北部和中部,侵入于元古代沙流河岩群中,岩石类型有花岗闪长岩和白云母二长花岗岩;花岗闪长岩分布相对广泛,形成时代为早泥盆世(青海省地质调查院,2003)。白云母二长花岗岩少量分布呈岩珠状产出目前尚无可靠的年代学资料。

2.2 岩石学特征

浅灰白色白云母二长花岗岩分布在胜利口东一带,岩性较为单一,区内见有两处,出露宽约250 m,长约800 m,平面形态呈透镜状。岩体侵入于元古代达肯大坂岩群灰色、灰黑色云母(石英)片岩中,与围岩接触关系明显,二者界线呈波状弯曲,围岩中多见白云母二长花岗岩岩脉穿插。在野外露头岩石受后期风化作用影响,破碎严重,多沿山坡呈碎石流出露(图2a)。白云母二长花岗岩与榴辉岩野外未见直接接触关系。

白云母二长花岗岩:呈浅灰白色,微细粒花岗结构,块状构造,无变形,矿物不具定向。主要矿物组成为斜长石、碱性长石、石英、白云母和少量的黑云母,副矿物有磷灰石、锆石(图2b)。斜长石含量为28%~32%,切面形态呈半自形粒状晶,晶体长短轴平均值在0.10~1.48 mm,0.20 mm以上的细粒级晶

粒占绝大部分,具较强的黏土化蚀变,见钠长双晶,测得钙长石组分的排号An=28左右,为更长石。碱性长石含量35%~39%,切面形态呈半自形粒状晶,他形粒状晶,晶体长短轴平均值在0.12~1.52 mm,细粒级晶粒占多数,具黏土化蚀变,发育格状双晶,为微斜长石。石英含量25%~28%,呈他形粒状晶,不规则粒状,粒径为0.08~1.04 mm,细粒级晶粒占多数。白云母含量3%~5%,色泽呈白色,呈自形一半自形片状,粒径为0.06~0.85 mm,沿其他矿物间分布、端面清晰,不具环带构造,未含其他矿物包裹体。磷灰石、锆石、榍石为岩石中的副矿物。

3 岩石地球化学与形成时代

3.1 样品采集

分析样品采于胜利口东地区,样号为SLKD,取样位置为:37°37'41.2"N, 95°20'14.7"E(图1b)。野外采集较为新鲜的岩石样品作为分析样品,室内通过薄片鉴定后并选择蚀变较弱的岩石,分别进行同位素测年、主量和微量元素测试。

3.2 分析方法

锆石的分选、制靶及阴极发光(CL)显微照相在河北省廊坊市区地质调查研究所实验室完成,在显微镜下选择具有代表性的锆石制作成样品靶,并用扫描电镜拍摄阴极发光(CL)图像。微区原位U-Pb年龄测定在北京燕都中实测试技术有限公司实验室完成。U-Pb定年中的激光剥蚀系统使用的是NewWaveUP213, ICP-MS是布鲁克M90,锆石标准采用的是91500和Plesovice进行同位素分馏校正。



图2 胜利口东地区白云母二长花岗岩野外露头(a)和镜下特征(b)

Pl—斜长石;Kf—钾长石;Qz—石英;Mu—白云母;Bit—黑云母

Fig.2 Outcrop (a) and microscopic characteristics (b) of muscovite monzogranite in Shenglikoudong area

Pl—Plagioclase; Kf—Potash feldspar; Qz—Quartz; Mu—Muscovite; Bit—Biotite

普通铅计算按3D坐标法进行的校正(Anderson, 2002),同位素比值以及元素含量计算采用为GLITTER4.4处理,谐和曲线和加权平均年龄的计算采用Isoplot3.2等程序完成。

主、微量元素在武汉综合岩矿测试中心进行测试,样重2.5 kg左右,利用切乔特公式进行粗碎、中碎、细碎缩分留存样本量,制备过程中用四分法反复缩分至需要的样本重量;粗碎过程中要留存粗副样,细碎过程中要留存分析副样。粗碎正样、副样各200 g左右,分析正样、副样100 g左右。主量元素分析用X荧光光谱法完成,仪器使用菲利普PW2440型波长色散X-射线荧光光谱仪,稀土分析采用的是阳离子交换分离-电感耦合等离子体原子发射光谱法,微量元素分析采用的是电感耦合等离子质谱法(ICP-MS),仪器是美国热电公司X7电感耦合等离子质谱仪。

在样品完成锆石U-Pb定年测试的基础上,在北京燕都中实测试技术有限公司实验室进行了锆

石Lu-Hf同位素分析测试,其中锆石Lu-Hf同位素测点位置与U-Pb定年测点位置为同一锆石颗粒内的同一岩浆生长环带上。由美国的热电Neptune-plusMC-ICP-MS与NewWaveUP213激光烧蚀进样测试,步骤和校准方法类似(Wuetal.,2006)。锆石剥蚀使用的频率为8 Hz、能量是16 J/cm²激光剥蚀31 s,锆石中的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf比值低(小于0.001),¹⁷⁶Lu对¹⁷⁶Hf同位素干扰可以忽略不计,每个测试点¹⁷³Yb/¹⁷²Yb平均值用于计算Yb分馏系数,再扣除¹⁷⁶Yb对¹⁷⁶Hf的同质异位素干扰。数据的离线处理采用软件ICP-MSDatacal完成(吴福元,2007)。

3.3 分析结果

3.3.1 LA-ICP-MS 锆石U-Pb定年

所测样点经校正后的有效数据共22个(表1),测试的锆石(图3)多呈无色透明,金刚光泽,颗粒较为粗大,多在50 μm×100 μm左右,通常为自形一半自形,以柱状锆石居多,偶见球粒状锆石。但锆石震荡环带不发育,多数具有核边结构,测试结果中

表1 胜利口东白云母二长花岗岩锆石U-Pb同位素分析结果数据
Table1 U-Pb isotope age determined result of muscovite monzogranite in Shenglikoudong area

点号	含量/(μg/g)		同位素比值						表面年龄/Ma	
	U	Th	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
SLK-01	368.04	75.45	0.055792	0.000574	0.534284	0.005728	0.069437	0.000523	432.7	3.155454
SLK-03	493.83	32.64	0.056559	0.000481	0.543305	0.005176	0.069564	0.000445	433.5	2.683184
SLK-05	177.22	3.13	0.05049	0.001615	0.48518	0.015792	0.069428	0.001039	432.7	6.264904
SLK-06	759.25	6.97	0.054862	0.000856	0.52689	0.008255	0.069568	0.00061	433.5	3.677875
SLK-08	199.94	9.89	0.053392	0.000847	0.510389	0.007839	0.069338	0.000535	432.1	3.2246
SLK-09	371.76	31.42	0.055037	0.000924	0.527967	0.009163	0.069622	0.000708	433.8	4.268133
SLK-10	758.64	37.31	0.054939	0.000751	0.526912	0.007046	0.069533	0.000384	433.3	2.317496
SLK-11	461.54	17.80	0.054911	0.000589	0.526784	0.006149	0.069552	0.000472	433.4	2.843472
SLK-13	404.87	21.41	0.054951	0.000725	0.527503	0.007764	0.06952	0.000519	433.2	3.129685
SLK-14	195.91	2.30	0.055043	0.00098	0.525854	0.009187	0.069421	0.000488	432.6	2.939607
SLK-15	1553.25	365.54	0.05518	0.000547	0.529922	0.00702	0.069532	0.000588	433.3	3.544656
SLK-16	964.17	156.77	0.054277	0.001191	0.51925	0.012124	0.069421	0.000693	432.6	4.17824
SLK-17	1085.47	312.63	0.055252	0.000591	0.529336	0.006561	0.069419	0.000483	432.6	2.9122
SLK-19	1146.37	70.39	0.053263	0.001015	0.507638	0.013339	0.069334	0.001191	432.1	7.177507
SLK-20	2665.23	47.90	0.054216	0.002326	0.516899	0.018389	0.069566	0.001109	433.5	6.685169
SLK-21	1114.31	287.24	0.055559	0.001177	0.535655	0.012026	0.069808	0.000697	434.9	4.198609
SLK-22	205.11	1.81	0.052797	0.001751	0.517691	0.0218	0.069783	0.001186	434.8	7.148865
SLK-23	1454.97	586.44	0.05454	0.000981	0.52444	0.013657	0.069632	0.001087	433.9	6.549352
SLK-25	511.68	7.10	0.053323	0.001522	0.51302	0.022421	0.069858	0.001982	435.2	11.94266
SLK-26	410.14	21.23	0.054728	0.002177	0.524783	0.025898	0.06947	0.001621	432.9	9.770958
SLK-28	1141.93	281.81	0.055386	0.001108	0.535411	0.017895	0.069598	0.001162	433.7	7.002048
SLK-29	341.9	2.52	0.056474	0.001501	0.544511	0.019726	0.069598	0.001261	433.7	7.599529

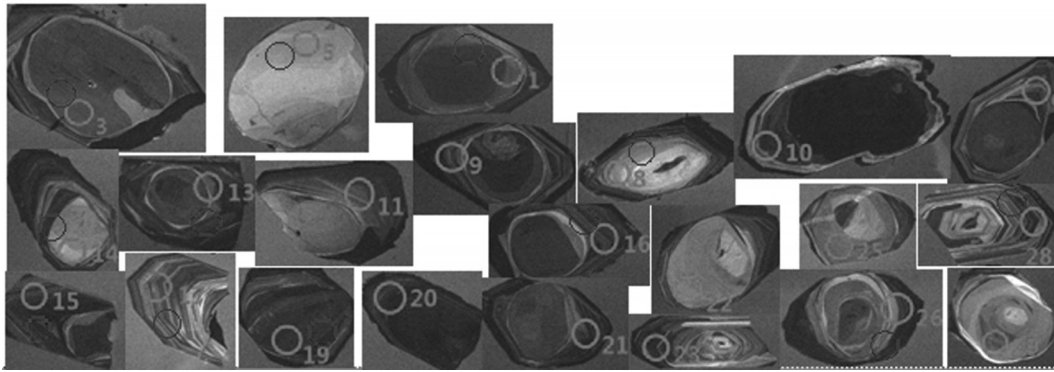


图3 胜利口东白云母二长花岗岩锆石CL图像和点位
(红圈代表U-Pb测点位置;蓝圈代表Lu-Hf测点位置;圆圈旁数字代表点号)

Fig.3 CL images of muscovite monzogranite in Shenglikoudong area

(The red circle represents the location of U-Pb measurement points; The blue circle represents the position of Lu-Hf measuring point; The number next to the circle represents the dot)

多数测点的Th/U比值小于0.1,综合分析倾向于深熔作用过程中形成的锆石。分析数据后获得22颗锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄加权平均值为(433.2±1.6)Ma(MSWD=0.026)(图4a),为中志留世。加权平均年龄与单个样点分析结果在误差范围内基本一致,在谐和图上成群集中分布(图4b),部分点偏离谐和线稍远外,其余各点聚集在谐和线上及其附近很小的区域范围内,说明普通Pb丢失对测年数据影响不大,所测精度较高。

3.3.2 主微量元素

白云母二长花岗岩氧化物含量及特征参数见表2,从表中可以看出:SiO₂含量变化于73.50%~

74.97%,平均含量为74.14%;Al₂O₃含量为13.95%~14.50%,Na₂O含量为3.42%~4.01%,K₂O含量为3.9%~4.63%,全碱含量为8.59~7.95,铝饱和指数A/CNK为1.12~1.19,属强过铝质范围。白云母二长花岗岩的K₂O/Na₂O比值介于1.12~1.35,在SiO₂-K₂O图解中岩石位于高钾钙碱性系列(图5)。因此,主量元素地球化学结果显示白云母二长花岗岩为强过铝质高钾钙碱性岩石。

稀土元素含量见表2,稀土总量为(72.25×10⁻⁶~83.38×10⁻⁶,平均值为77.61×10⁻⁶,LREE的含量为62.2×10⁻⁶~71.64×10⁻⁶,平均为66.33×10⁻⁶,HREE含量为9.32×10⁻⁶~13.74×10⁻⁶,平均为11.27×

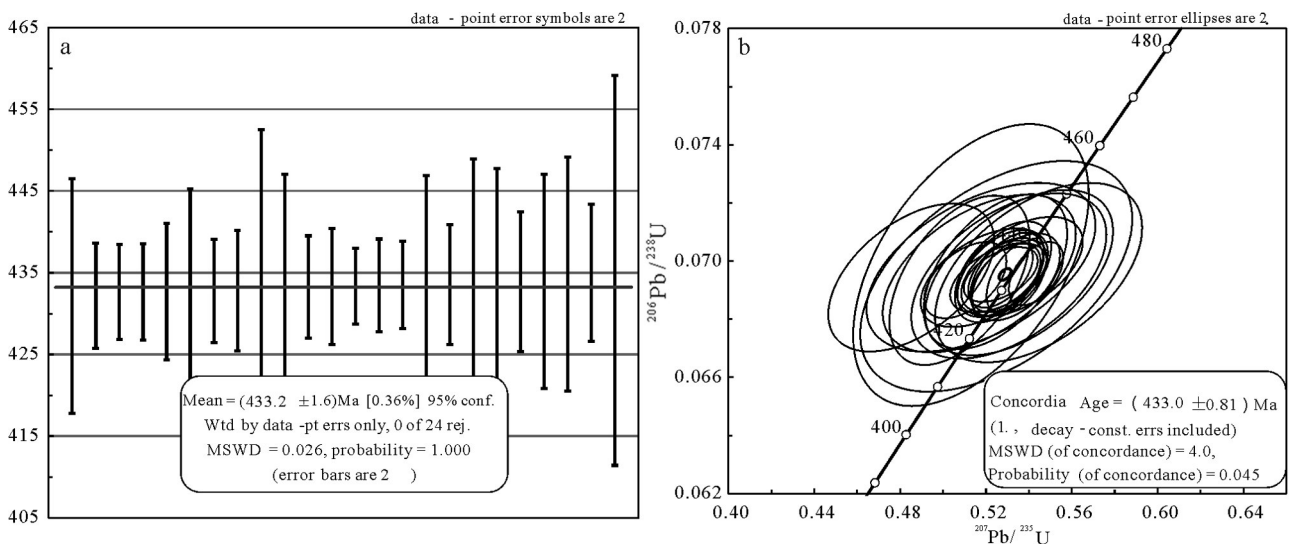
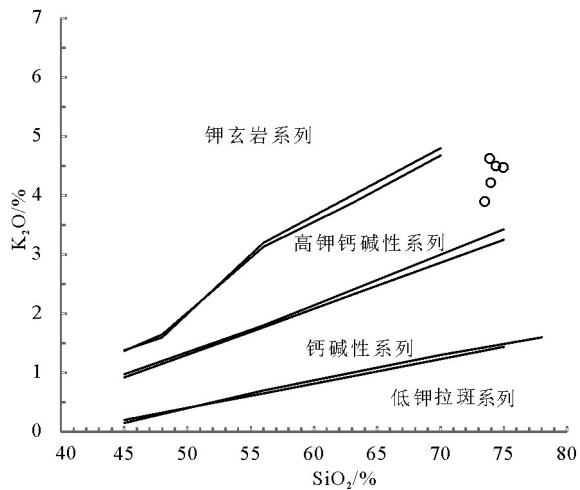


图4 胜利口东白云母二长花岗岩锆石U-Pb年龄加权图(a)和谐和图(b)

Fig.4 U-Pb concordia diagrams and weighted plot of muscovite monzogranite in Shenglikoudong area

图5 SiO₂-K₂O图解(据Le Maitre, 2002)Fig.5 SiO₂-K₂O diagram(after Le Maitre, 2002)

10⁻⁶,在稀土配分模式图上曲线基本一致,配分曲线明显右倾(图6)。(La/Yb)_N为5.8~7.6,LREE富集,HREE亏损,轻重稀土元素显示分馏程度较高,δEu值为0.32~0.63,具有Eu负异常。岩石样品的在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图7),显示亏损Nb、Ta、Sr和Ti等元素,轻微亏损Ba元素,而Rb、U等元素则相对富集的特征。

3.3.3 锆石 Hf 同位素

对样品中已经定年的锆石颗粒进行 Lu-Hf 同

位素分析,测试结果见表3,测点编号同表1中的同位素测年的测点号。由于测试点的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf比值较小(平均值为0.0004),说明锆石在形成后由Lu衰变形成的Hf极少,所测得的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值能够反映出岩石结晶演化过程中Hf同位素的组成情况(吴福元,2007)。另外,锆石样品的 f_{LuHf} 值较低(平均值为-0.97),说明所测得的锆石Lu-Hf同位素二阶段模式年龄(T_{DM2})能够指示其源区物质在地壳中存留的年限。通过对12个点的Hf同位素分析可得:¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值为0.282051~0.282541,平均值为0.28235,根据对应测点锆石的U-Pb形成年龄433.2 Ma计算, $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为负值,介于-5.2~-16.0,平均值为-7.2,对应的Hf同位素地壳模式年龄(T_{DM2})分布范围为1.86~2.20 Ga,平均值为1.99 Ga。

4 讨 论

胜利口东白云母二长花岗岩主要由斜长石、钾长石、石英和白云母,以及磷灰石、锆石、榍石等副矿物组成。岩石地球化学特征具高SiO₂,低MgO和高K₂O的特征,K₂O/Na₂O比值介于1.12~1.35;A/CNK为1.12~1.19,属强过铝质范围。岩石样品的稀土分馏程度较高,(La/Yb)_N为5.8~7.6;δEu值为0.32~0.63,均具负铕异常,重稀土亏损;微量元

表2 胜利口东白云母二长花岗岩主量元素(%)、微量元素(10⁻⁶)分析结果Table 2 Major element(%) and trace element(10⁻⁶) compositions of the samples from Shenglikoudong area

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O+	Lost
1-1	73.88	0.05	14.09	0.34	0.45	0.02	0.26	1.21	3.42	4.63	0.06	0.55	0.89	1.27
1-2	73.97	0.08	14.28	0.21	0.70	0.02	0.29	1.14	3.75	4.22	0.06	0.34	0.75	0.91
1-3	74.38	0.07	14.28	0.11	0.50	0.01	0.26	0.95	4.01	4.50	0.05	0.08	0.62	0.52
1-4	74.97	0.05	13.95	0.21	0.35	0.02	0.21	0.92	3.57	4.47	0.05	0.29	0.80	0.87
1-5	73.50	0.08	14.50	0.20	0.83	0.03	0.28	1.29	3.95	4.52	0.06	0.31	0.93	0.88
样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1-1	16.84	31.71	3.89	15.07	3.75	0.39	3.47	0.62	3.93	0.80	2.20	0.33	2.08	0.32
1-2	14.99	28.17	3.27	12.37	2.88	0.53	2.57	0.45	2.83	0.58	1.59	0.24	1.55	0.24
1-3	15.19	28.64	3.34	12.69	2.96	0.55	2.63	0.48	2.97	0.60	1.66	0.24	1.61	0.25
1-4	17.14	30.50	3.93	15.17	3.59	0.42	3.27	0.59	3.62	0.76	2.06	0.30	1.92	0.30
1-5	15.58	28.61	3.29	12.74	2.94	0.56	2.45	0.43	2.58	0.52	1.45	0.21	1.46	0.23
样号	Y	Rb	K	Ba	Th	U	Nb	Sr	Nd	Sc	Zr	Hf	Ta	V
1-1	21.85	188.42	38402.37	313.15	8.14	2.38	8.61	131.27	15.07	5.27	48.50	1.40	1.34	3.12
1-2	15.57	142.69	34998.69	479.63	6.34	2.22	8.06	212.34	12.37	4.91	56.70	1.70	1.30	4.02
1-3	16.34	133.00	37338.91	493.71	6.72	2.23	5.86	225.97	12.69	4.25	55.65	1.70	1.04	3.95
1-4	20.36	170.40	37129.16	348.00	6.76	2.22	7.60	146.59	15.17	4.67	49.85	1.50	1.44	2.08
1-5	14.17	133.36	32342.77	468.27	6.09	2.26	8.56	224.36	12.74	4.43	61.45	1.95	1.22	3.52

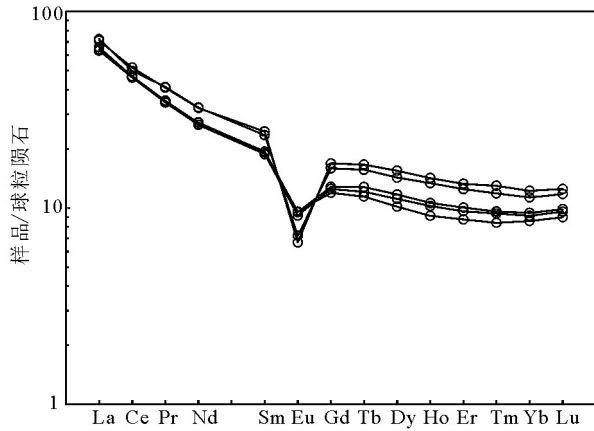


图6 稀土元素标准化配分图(标准化值据Sun and McDonough,1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns(normalized data after Sun and McDonough,1989)

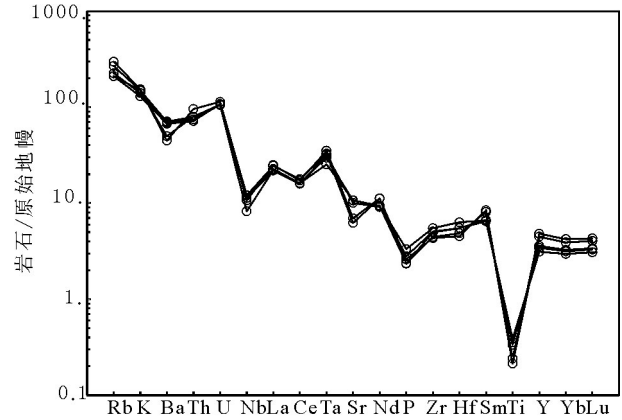


图7 微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化值据Sun and McDonough,1989)

Fig.7 Webdiagram of metamorphic intrusive rock (normalized data after Sun and McDonough,1989)

素中亏损Nb、Ta、Sr、Ti,富集Rb、U;显示出S型花岗岩的地球化学特征。研究表明,I型花岗岩的 P_2O_5 与 SiO_2 呈明显的负相关关系,S型花岗岩的 P_2O_5 将随着 SiO_2 的增加而呈增高或基本不变的趋势,这一方法已被成功地用于区分I型和S型花岗岩(李献华,2007)。胜利口东白云母二长花岗岩 P_2O_5 含量较为稳定,随 SiO_2 含量的增加基本保持不变;在花岗岩的Hf-Ta-Rb判别图解(图8)和 R_1-R_2 判别图解(图9)中样品均落在同碰撞区域内,指示白云母二长花岗岩为S型花岗岩。柴达木盆地北缘早古生代构造演化目前已有大量的研究资料,早古生代柴达木地体和祁连地体之间存在柴北缘洋,洋壳俯冲消减期为545~440 Ma,随着洋壳的不断俯冲和消减,陆间

洋盆、弧后盆地逐渐消失闭合,微陆块间逐步接近靠拢,最终发生弧陆碰撞和陆陆碰撞,转入陆内造山阶段。陆陆碰撞/陆壳深俯冲时期为440~400 Ma(任军虎,2010)。胜利口东白云母二长花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄值为 (433.2 ± 1.6) Ma,岩石样品的稀土分馏程度较高,均具负铕异常,Sr含量偏低,重稀土亏损,应是麻粒岩相条件下部分熔融的产物,即源区有斜长石和石榴石残留。因此推测是榴辉岩地体折返过程中部分熔融的产物(脱离了榴辉岩相区),应形成于造山峰期之后。

白云母二长花岗岩均具有低且负的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-5.2~-16.0)和古老的 T_{DM2} 模式年龄(2.20~1.88 Ga),反映其源岩为古元古代地壳。区内由达肯大坂

表3 白云母二长花岗岩锆石原位Hf同位素组成

Table3 Zircon in situ Hf isotope composition of the muscovite monzgranite

测点	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon_{Hf}(0)$	$\epsilon_{Hf}(t)$	$T_{DM1/Ga}$	$T_{DM2/Ga}$	$f_{La/Hf}$
01	0.000821	0.000027	0.000002	0.282353	0.000019	-14.8	-5.317	1.2	1.95	-0.99
03	0.001351	0.000041	0.000001	0.282381	0.000018	-13.8	-5.308	1.2	1.88	-0.99
05	0.001117	0.000033	0.000001	0.282051	0.000018	-25.5	-16.009	1.6	2.20	-0.99
08	0.005130	0.000184	0.000011	0.282356	0.000019	-14.7	-5.248	1.2	1.93	-0.99
13	0.028649	0.001028	0.000019	0.282393	0.000021	-13.4	-5.182	1.2	1.86	-0.96
14	0.009563	0.000350	0.000033	0.282230	0.000023	-19.2	-9.746	1.4	2.03	-0.98
15	0.044880	0.001478	0.000014	0.282532	0.000024	-15.5	-5.638	1.2	1.91	-0.95
16	0.026733	0.000906	0.000050	0.282422	0.000023	-12.4	-6.131	1.2	1.89	-0.97
17	0.032725	0.001102	0.000011	0.282541	0.000022	-8.2	-6.050	1.1	1.92	-0.96
19	0.001070	0.000035	0.000001	0.282322	0.000021	-15.9	-6.422	1.3	2.01	-0.99
26	0.001541	0.000052	0.000005	0.282329	0.000017	-15.7	-6.158	1.3	2.03	-0.99
28	0.001160	0.000037	0.000001	0.282286	0.000018	-17.2	-7.668	1.3	2.11	-0.99

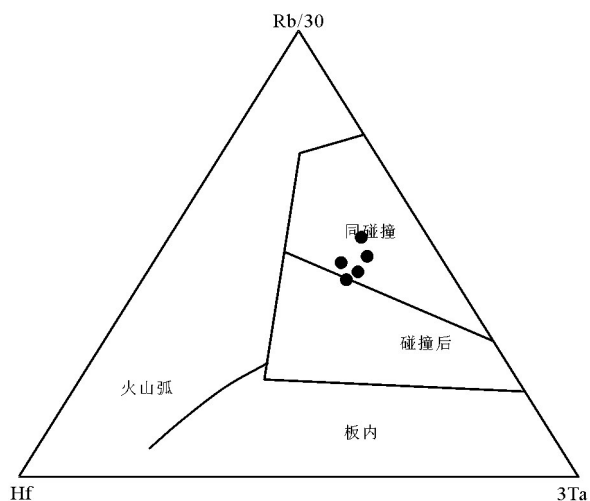


图8 Hf-Ta-Rb图解(据 Peace, 1984)
Fig.8 Hf-Ta-Rb diagram(after Peace, 1984)

岩群组成其变质基底,达肯大坂岩群形成时代为2.32~1.96 Ga,经历了1.96~1.80 Ga的区域变质作用(Lu, 2008; Chen, 2009),由此推断达肯大坂岩群是白云母二长花岗岩源区的最好选择。

近年来,详细的年代学研究资料显示柴北缘高压—超高压变质带的峰期变质时代为420~457 Ma(Zhang et al., 2005; 宋述光, 2011)。柴北缘超高压变质作用证据表明柴北缘俯冲碰撞带曾被俯冲到80~100 km(部分要达150~200 km)的地幔深度,其原岩十分复杂,主要有新元古代大陆裂谷环境的板内玄武岩(850~820 Ma),早古生代洋壳或早古生代洋陆俯冲沟弧系内的基性岩(540~500 Ma)(杨经绥, 2003; 宋述光等, 2007a; Song et al., 2010; 张贵宾, 2012)。超高压变质作用也存在两阶段,早期类似于环太平洋型,即与大洋俯冲相关的超高压变质作用(445~457 Ma);晚期为阿尔卑斯型,即与大陆深俯冲相关的超高压变质作用(420~435 Ma),峰期变质大约在432 Ma(Zhang et al., 2005; 陈丹玲, 2007; Zhang et al., 2008; 宋述光, 2011)。碰撞阶段深俯冲带岩浆活动十分微弱,笔者在柴北缘俯冲碰撞杂岩带胜利口东榴辉岩带中发现了少量产出的白云母二长花岗岩($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(433.2±1.6)Ma),也进一步证明了碰撞造山作用发生的时代。

5 结论

(1)胜利口东中志留世白云母二长花岗岩的发

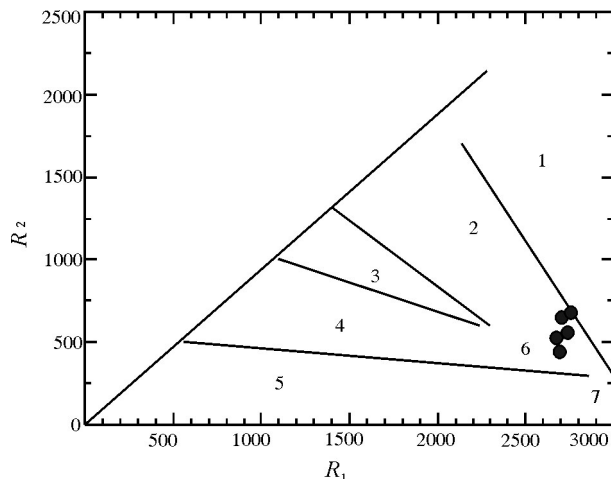


图9 R_1 - R_2 图解(据 Batchelor, 1985)
1—地幔分离的;2—板块碰撞前的;3—碰撞后的抬升;4—造山晚期的;5—非造山的;6—同碰撞期的;7—造山期后的
Fig.9 R_1 - R_2 diagram(after Batchelor, 1985)
1—Mantle separated;2—Before plate collision;3—Uplift after collision;4—Late orogenic;5—Non orogenic;6—In the same collision period;7—Post orogenic

现证明柴北缘高压—超高压带碰撞时期有微弱岩浆活动发生。

(2)白云母二长花岗岩样品LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素分析的结果表明,其年龄值为(433.2±1.6)Ma(MSWD=0.026),进一步限定了柴北缘碰撞造山作用发生的时代。

(3)锆石Hf同位素显示胜利口东白云母二长花岗岩源于古元古代地壳物质的重熔再造。

致谢: 本文在撰写过程中,得益于审稿专家提出的宝贵修改意见,在此致以诚挚的感谢!

References

- Anderson T. 2002. Correction of commonleadin U-Pb analyses that donotre port ^{204}Pb [J].Chemical Geology,192(1/2):59-79.
- Chen Danling,Sun Yong,Liu Liang. 2007. The metamorphic ages of the country rock of the Yukake eclogites in the North Qaidam and its geological significance[J].Earth Science Frontiers,14(1):108-116(in Chinese with English abstract).
- Chen Nengsong,Gong S L,Sun M,Li X Y,Xia X P,Wang Q Y,Wu F Y, Xu P.2009.Precambrian evolution of the Quanji Block, northeastern margin of Tibet: In sights from zircon U-Pb and Lu-Hf isotopecom positions[J].Journal of Asian Earth Sciences,35:367-376.
- Hu Nenggao,Wang Xiaoxia,Sun Yangui,Lin Wei. 2008. Petrography and geochemistry of the Tataleng rapakivi graniteon the northern

- margin of the Qaidam basin, northwestern China[J]. Geological Bulletin of China, 27(11): 1923–1932 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Lu Songnian, Wang Huichu. 2003. Qianji Group—the geological record of the Rodinia supercontinent break-up in the early Neoproterozoic preserved in the northern Qaidam margin, Qinghai, Northwest China [J]. Geological Survey and Research, 26(1): 27–37 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2007. Further discussion on genetic types and tectonic significance of early Yanshanian granites in Nanling [J]. Chinese Science Bulletin, 52(9): 981–991 (in Chinese).
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaikun, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zheng Jiankang. 2002. Redefinition of the “Dakendaban Group” on the northern margin of the Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 21(1): 19–23 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong. 2004. Late Mesoproterozoic–Early Neoproterozoic evolution of the Qinling orogen[J]. Geological Bulletin of China, 23(2): 107–112 (in Chinese with English abstract).
- Meng Fancun, Zhang Jianxin, Yang Jingsui. 2005. Tectono-thermal event of post HP/UHP metamorphism in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: Isotopic and geochemical evidence of granite and gneiss [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 45–56 (in Chinese with English abstract).
- Qinghai Institute of Geological Survey. 2003. J46E013020 (Lüliangshan) range, J46E013021 (Yikechaidamu) range 1: 50000 Regional Geological Survey Report (in Chinese with English abstract).
- Ren Junhu. 2010. A Study on Tectonic Evolution during the Period of Nanhua to Devonian at the North and South of Qaidam Basin[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Yang Jingsui. 2001. Sanidine quartz inclusions in Dulan eclogites: Evidence for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam basin [J]. Acta Geologica Sinica, 75(2): 180–185 (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling. 2007. Two types of peridotite in continental orogenic belts: a case study from the North Qaidam UHP metamorphic belt[J]. Earth Science Frontiers, 14(2): 129–138 (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Zhang Cong, Li Xianhua. 2011. HP/UHP metamorphic time of eclogite in the Xitieshan terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1191–1197 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Wooden J L. 2004. Zircon SHRIMP dating of the Yematan granite, Dulan, North Qaidam[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1667–1672 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Suoping. 2008. Zircon SHRIMP ages and geochemistry of granite Qaidam[J]. Science in China (Ser. D), 38(8): 930–949 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Li Zhaoli. 2014. Zircon SHRIMP U–Pb dating of granites from Dulan and the chronological framework of the North Qaidam UHP Belt, NW China[J]. Science China: Earth Science, 57: 2945–2965 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei. 2007. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqing, Li Haibin. 1998. Discovery of eclogite at northern margin of Qaidam basin, NW China[J]. Chinese Science Bulletin, 43: 1544–1549 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqing, Song Shuguang. 2000. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai Province and its significance for studying the HP–UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China[J]. Acta Geologica Sinica, 74(2): 156–168 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqing. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam Early Paleozoic ultrahigh pressure (UHP–HP) metamorphic belt, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 75(2): 175–179 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Meng Fancun. 2003. Ultrahigh pressure eclogites of the North Qaidam and Altun mountains, NW China and their protoliths [J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 291–314 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guibin, Zhang Lifei, Song Shuguang. 2012. An overview of the tectonic evolution of North Qaidam UHPM Belt: From oceanic subduction to continental collision[J]. Geological Journal of China Universities, 18(1): 28–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Meng Fancun. 2005. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints[J]. Lithos, 84: 51–57.
- Zhang Linfen, Lu Zhong, Zhang Guibin. 2008. The geological characteristics of oceanic-type UHP metamorphic belts and their tectonic implications: Case studies from Southwest Tianshan and North Qaidam in NW China [J]. Chinese Science Bulletin, 53(20): 3120–3130.
- Zhang Yanjun, Sun Fengyue, Xu Chenghan, Yu Lu. 2016. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Tanjianshan granite porphyry intrusion in Dachaidan Area of the North Margin of Qaidam Basin[J]. Earth Science, 41(11): 1830–1844 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Jun, Hu Chaonan, Fan Honghai, Cai Yuqi, Chen Qing, Chen Jinyong, Meng Yanning. 2019. A new type U–Th–REE–Nb mineralization related to albitite: A case study from the Chachaxiangka deposit in the northeastern Qaidam Basin of China[J]. China Geology, 2: 422–438.
- Zhou Bin, Zheng Youye, Xu Rongke, Wang Yongkai, Zhang Xiaopen, Wu Liang. 2013. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating and Hf isotope geochemical characteristics of Qaidamshan intrusive body[J].

- Geological Bulletin of China, 32(7): 1027–1034 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaohui, Chen Danling, Liu Liang, Wang Chao, Yang Wenqiang, Cao Yuting, Kang Lei. 2013. Geochemistry geochronology and Hf isotopic compositions of the Tuanyushan pluton from the western segment of the northern Qaidam[J]. Geological Journal of China Universities, 19(2): 233–244 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈丹玲, 孙勇, 刘良. 2007. 柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其地质意义[J]. 地学前缘, 14(1):108–116
- 胡能高, 王晓霞, 孙延贵, 林伟, 申文环, 陈运杰. 2008. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的岩相学和地球化学特征[J]. 地质通报, 27(11):1923–1932.
- 李怀坤, 陆松年, 王惠初, 相振群, 郑建康. 2003. 青海柴北缘新元古代超大陆裂解的地质记录——全吉群[J]. 地质调查与研究, 26(1):27–37.
- 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):981–991.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 袁桂邦, 辛后田, 郑健康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. 地质通报, (21):19–23.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤. 2004. 秦岭造山带中—新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, (2):107–112
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 2005. 柴北缘锡铁山早古生代 HP/UHP 变质作用后的构造热事件——花岗岩和片麻岩的同位素与岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 21(1):45–56.
- 青海省地质调查院. 2003. J46E013020(绿梁山)幅、J46E013021(依克柴达木湖)幅 1:5 万区域地质调查报告.
- 任军虎. 2010. 柴达木盆地南、北缘南华—泥盆纪构造演化:博士学位论文[D]. 西安:西北大学.
- 宋述光, 杨经绥. 2001. 柴达木盆地北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体:超高压变质作用的证据[J]. 地质学报, 75(2):180–185.
- 宋述光, 张立飞, 牛耀龄, 张贵宾. 2007. 大陆碰撞造山带的两类橄榄岩——以柴北缘超高压变质带为例[J]. 地学前缘 14(2):129–138.
- 宋述光, 张聪, 李献华, 张立飞. 2011. 柴北缘超高压带中锡铁山榴辉岩的变质时代[J]. 岩石学报, 27(4):1191–1197.
- 吴才来, 杨经绥, Wooden J L, Shi R D, Chen S Y, Meibom A, Mattinson C G. 2004. 柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 科学通报, 49(16):1667–1672
- 吴才来, 邵源红, 吴锁平, 陈其龙. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U–Pb 定年及其岩石地球化学特征[J]. 中国科学:地球科学, 38(8): 930–949.
- 吴才来, 邵源红, 李兆丽, 雷敏, 秦海鹏, 李名则, 刘春花. 2014. 都兰花岗岩锆石 SHRIMP 定年及柴北缘超高压带花岗岩年代学格架[J]. 中国科学:地球科学, 44(10): 2142–2159.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185–220.
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵. 1998. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义[J]. 科学通报, 43(14): 1544–1549 .
- 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 万渝生, 李海兵, 金小赤. 2000. 青海都兰榴辉岩的发现及对中国中央造山带内高压—超高压变质带研究的意义[J]. 地质学报, 74(2): 156–168.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 李海兵, 万渝生, 刘焰, 邱海峻, 刘福来. 2001. 柴北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型的超高压矿物——柯石英[J]. 地质学报, 75(2): 175–179.
- 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 史仁灯, 吴才来, 许志琴, 李海兵, 陈松永. 2003. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨[J]. 地学前缘, 10(3): 291–314.
- 张贵宾, 张立飞, 宋述光. 2012. 柴北缘超高压变质带:从大洋到大陆的深俯冲过程[J]. 高校地质学报, 18(1): 28–40.
- 张延军, 孙丰月, 许成瀚, 禹禄. 2016. 柴北缘大柴旦滩间山花岗岩斑岩体锆石 U–Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素[J]. 地球科学, 41(11): 1830–1844.
- 周宾, 郑有业, 许荣科, 王永开, 张小鹏, 吴亮. 2013. 青海柴达木山岩体 LA–ICPMS 锆石 U–Pb 定年及 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 32(7): 1027–1034.
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 王超, 杨文强, 曹玉亭, 康磊. 2013. 柴北缘西段团鱼山岩体的地球化学、年代学及 Hf 同位素示踪[J]. 高校地质学报, 19(2): 233–244.