



引文格式: 王怀涛, 徐磊, 脱世博, 等. 破城山花岗闪长岩: 北山北带早古生代洋盆俯冲作用的产物[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 143–155. DOI: 10.12401/j.nwg.2025081

Citation: WANG Huaitao, XU Lei, TUO Shibo, et al. Pochengshan Granodiorite: the Product of Early Paleozoic Ocean Basin Subduction in the Beishanbei North Belt[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 143–155. DOI: 10.12401/j.nwg.2025081

破城山花岗闪长岩: 北山北带早古生代 洋盆俯冲作用的产物

王怀涛^{1,2,3}, 徐磊^{1,2,3,*}, 脱世博^{1,2,3}, 刘胜江^{1,2,3}, 张海峰^{1,2,3}, 唐文轶⁴

(1. 甘肃省地学大数据工程研究中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省矿产资源勘查重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 马鬃山弧是北山造山带重要的组成部分, 其广泛分布的早古生代侵入岩, 对研究北山地区早古生代构造岩浆演化具有重要意义。本次研究深入探讨了马鬃山弧中破城山花岗闪长岩的岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学特征。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 (451.4 ± 1.9) Ma (MSWD=1.2), 属晚奥陶世早期。岩石具较高的 SiO_2 (62.25%~69.6%)、 Al_2O_3 (14.34%~14.68%) 和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (6.07%~6.44%), A/CNK 为 0.91~1.17, 为高钾钙碱性、准铝质花岗岩。稀土元素配分曲线呈平缓右倾模式, 轻稀土元素和大离子亲石元素 (Rb、Th、K 等) 相对富集, 高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 等亏损。研究表明, 破城山花岗闪长岩是俯冲环境下新生下地壳在幔源岩浆底侵作用下发生部分熔融的产物, 且岩浆源区遭受了俯冲带流体的交代和幔源组分的加入, 是红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩所代表的古大洋晚奥陶世早期向北俯冲的响应。

关键词: 晚奥陶世; 花岗闪长岩; 锆石 U-Pb 定年; 俯冲作用; 破城山; 北山北带

中图分类号: P583

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0143-13

Pochengshan Granodiorite: the Product of Early Paleozoic Ocean Basin Subduction in the Beishanbei North Belt

WANG Huaitao^{1,2,3}, XU Lei^{1,2,3,*}, TUO Shibo^{1,2,3}, LIU Shengjiang^{1,2,3}, ZHANG Haifeng^{1,2,3}, TANG Wenyi⁴

(1. Geoscience big data engineering research center of Gansu province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Key Laboratory of Mineral Exploration, Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 4. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The Mazongshan arc is an important component of the Beishan orogenic belt, and its widely distributed Early Paleozoic intrusive rocks are of great significance for studying the early Paleozoic tectonic and

收稿日期: 2024-04-08; 修回日期: 2025-05-20; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项 (2025ZD1008202、2025ZD1009600), 自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目 (ZKKJ202410), 甘肃省省级基础地质调查项目 “甘肃省肃北县大—明镇—白头山地区 1:5 万区域地质矿产调查”, 甘肃省自然资源大数据和国土空间治理能力建设项目 (HT-GJGK2022169-02) 联合资助。

作者简介: 王怀涛 (1985–), 男, 高级工程师, 博士, 从事矿产勘查及地学大数据方法技术研究工作。E-mail: 359921417@qq.com。

* 通讯作者: 徐磊 (1986–), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事区域地质矿产调查研究工作。E-mail: 397315452@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

magmatic evolution in the Beishan area. This study conducted petrological, geochemical, and zircon U-Pb geochronological studies on the Pochengshan granodiorite in the Mazongshan arc. The LA-ICP MS zircon U-Pb age is 451.4 ± 1.9 Ma (MSWD=1.2), indicating an early Late Ordovician period. The rock has high SiO_2 (62.25-69.6%), Al_2O_3 (14.34-14.68%), $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (6.07-6.44%), and is a high potassium calcium alkaline, quasi aluminous granite. The distribution curve of rare earth elements shows a gentle right tilt, with light rare earth elements slightly enriched, enriched in large ion lithophilic elements (such as Rb, Ba, Th, K), and depleted in high field strength elements (such as Nb, Ta, Sr, P, Ti). The geochemical characteristics indicate that the Pochengshan granodiorite is a product of partial melting of the newly formed lower crust under the influence of mantle derived magma intrusion in a subduction environment, and the magma source area has been subjected to the alteration of subduction zone fluids and the addition of mantle derived components. It is a response to the northward subduction of the early Late Ordovician in the ancient ocean represented by the Hongliuhe Niujuanzi Xichangjing ophiolite.

Keywords: Late Ordovician; granodiorite; zircon U-Pb dating; subduction; Pochengshan; Beishanbei north belt

北山地区位于蒙-甘-新交界处, 大地构造位置上处于哈萨克斯坦板块、塔里木板块和西伯利亚板块的接合带(图 1a)。该区域历经多期次、多阶段的俯冲与地体拼合过程, 区内频繁发育的岩浆作用对探讨中亚增生造山带的增生演化历史及板块俯冲-增生动力学机制具有重要科学价值(Xiao et al., 2010; Song et al., 2015; He et al., 2018)。北山地区花岗岩类岩石发育广泛, 具多期次侵位特征, 总的出露面积约占区域总面积 30%, 其中古生代花岗岩类占比约超过 90%(杨合群等, 2009)。前人对北山地区古生代花岗岩开展了一系列岩石学、地球化学、高精度年代学、Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素等方面的研究(李伍平等, 2001a, 2001b; 刘明强等, 2005, 2007; 江思宏等, 2006; 赵泽辉等, 2007; 李舫等, 2009, 2011; 杨合群等, 2009, 毛启贵等, 2010; Xiao et al., 2010; 张文等, 2011; 杨建国等, 2012; 朱江, 2013; 朱江等, 2015; 李小菲等, 2015; Song et al., 2015; 郑荣国等, 2016; 专少鹏等, 2018; 黄博涛等, 2021; 孙新春等, 2021; 吕鑫等, 2022), 由于对大地构造单元划分、蛇绿岩属性的认识不同, 致使对同一时代花岗岩的成因及其形成环境的解释存在争议。但是学者们均认为北山地区奥陶纪—早中志留世的岩浆活动与洋盆俯冲作用有关(李敏等, 2020; 辛后田等, 2020; 黄博涛等, 2021), 而在是由哪个古洋盆俯冲及俯冲方向存在较大的争议(Xiao et al., 2010; Song et al., 2015; 辛后田等, 2020); 部分学者认为晚志留世发生弧陆碰撞, 并伴随随后碰撞岩浆侵入(毛启贵等, 2010; Song et al., 2015; 李敏等 2020); 部分学者则认为该时期处于俯冲消减的环境(Xiao et al., 2010; He et al., 2018)。马鬃山

弧作为北山地区早古生代岩浆活动活跃区域, 是解析北山地区早古生代构造-岩浆演化过程的关键地段。笔者以北山北带明水地区 1:5 万区域地质矿产调查为基础, 选取工作区内破城山花岗岩闪长岩为研究对象, 通过系统的岩石学、全岩地球化学及锆石原位 U-Pb 同位素年代学测定等方法, 探讨北山北带早古生代构造-岩浆演化过程, 旨在为中亚造山带中段南带的动力学机制和构造演化提供新的地质证据。

1 地质背景

北山造山带作为中亚造山带南缘的重要组成部分, 在漫长复杂的地质演化过程中形成了 4 条近 EW 向展布的蛇绿混杂岩带, 自北向南依次为红石山-百合山-蓬勃山绿混杂岩带、芨芨台子-小黄山绿混杂岩带、红柳河-牛圈子-洗肠井绿混杂岩带、辉铜山-帐房山蛇绿混杂岩带(王国强等, 2021; 陈阳阳等, 2024; 刘生荣等, 2025; 武磊等, 2025)。由于学者们对蛇绿混杂岩的构造属性存在分歧, 导致对北山地区的大地构造演化存在不同的认识, 但是普遍认为北山地区的独特构造格局是由众多小的构造单元和构造块体拼接而成(左国朝等, 1990)。红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带将北山地区划分为北山北带、北山南带两部分。其中, 北山北带自北向南依次为雀儿山弧、黑鹰山-早山弧、马鬃山弧(公婆泉-东七一山弧), 北山南带自北向南为双鹰山-花牛山弧和石板山弧(图 1b, Xiao et al., 2010; 吕鑫等, 2022; 王必任等, 2024; 查显锋等, 2024)。

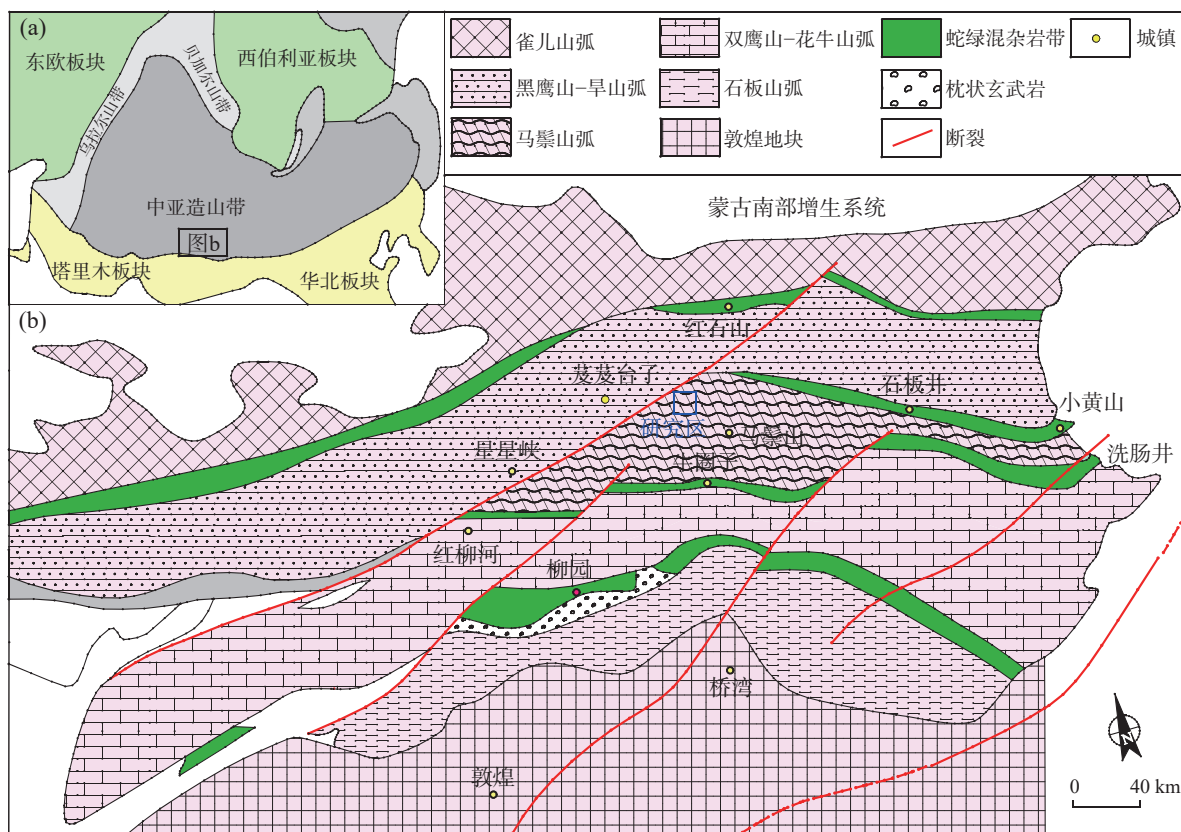


图1 北山造山带构造简图(据 Xiao et al., 2010; 吕鑫等, 2022)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Beishan orogenic belt

研究区位于北山北段西段的芨芨台子-小黄山蛇绿岩带南侧的马鬃山弧内(图 1b), 寒武纪—早石炭世马鬃山弧岩浆活动十分强烈, 且早古生代的岩体多数已发生强烈的变形(Song et al., 2013a, 2013b, 2015; Zheng et al., 2018; 李敏等, 2020; 黄博涛等, 2021)。笔者研究的花岗闪长岩岩体分布于破城山南部, 呈近 EW 向条带状展布, 由南北 2 个侵入体组成, 北部侵入体两侧均与破城山蛇绿混杂岩呈构造接触, 西南侧与三叠纪珊瑚井组呈角度不整合接触; 南部侵入体与三叠纪珊瑚井组呈角度不整合接触(图 2)。

2 岩石学特征

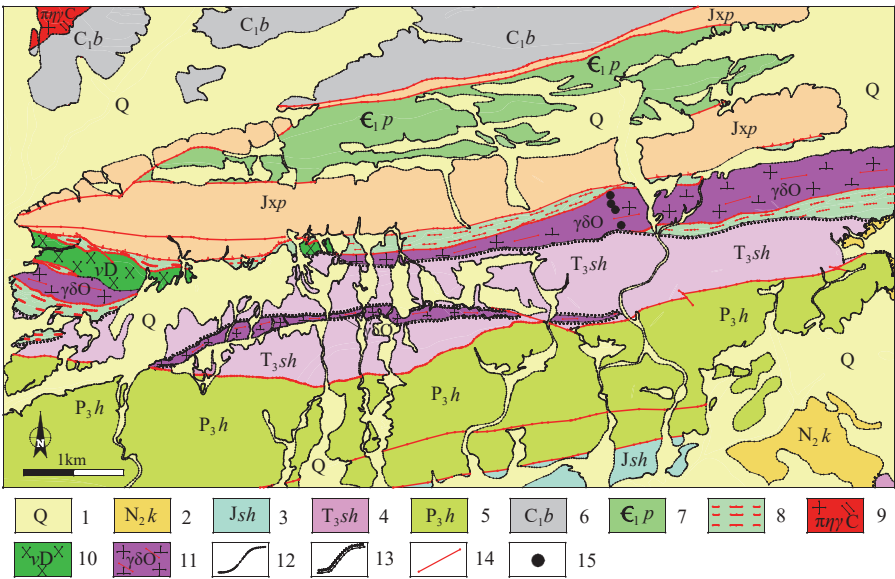
本次研究的花岗闪长岩手标本呈浅灰色-灰白色, 具中粒花岗结构(图 3)。岩石由斜长石(55%~60%)、钾长石(10%±)、石英(20%±)、角闪石(5%±)、黑云母(5%~10%)和少量副矿物(磷灰石、锆石等)组成, 矿物粒径为 2~5 mm。斜长石呈灰白色板条状半自形, 具一定程度的绢云母化、黏土化蚀变(图 3); 钾长石以微斜长石为主, 多呈半自形-他形厚板状; 石英呈

他形粒状, 局部破碎, 可见波状消光; 黑云母呈片状, 多具绿泥石化蚀变; 磷灰石(<1%)和锆石(<0.5%)多呈星散状分布。岩石普遍发育晚期热液蚀变特征, 以黏土化和绿泥石化为典型特征。

3 分析方法

本次研究样品的全岩主微量元素分析实验均在湖北省地质实验测试中心完成。其中主量元素含量测定采用 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪, 分析误差在 3% 以内; 微量元素含量分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS), 测得的元素含量相对标准偏差(RSD)被控制在 5% 以内。

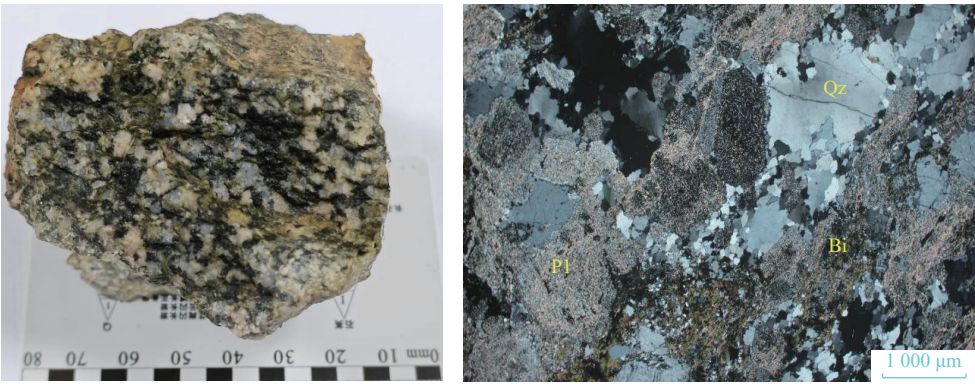
在武汉上谱分析科技有限责任公司进行锆石挑选、锆石制靶及锆石原位 U-Pb 同位素定年实验。通过样品粉碎、重液分选、电磁分选以及显微镜挑选等过程, 将挑选出的单颗粒锆石颗粒镶嵌于环氧树脂中进行抛光处理, 之后通过阴极发光、透射光、反射光拍照获取锆石微观形态特征。锆石原位微区 U-Pb 同位素定年采用 Agilent 7900 ICP-MS 与 GeoLas HD



1.第四系; 2.新近纪苦泉组; 3.侏罗纪水西沟群; 4.晚三叠世珊瑚井组; 5.晚二叠世红岩井组; 6.早石炭世白山组; 7.早寒武世破城山组; 8.蛇绿构造混杂岩带; 9.石炭纪二长花岗斑岩; 10.泥盆纪辉长岩; 11.奥陶纪糜棱岩化花岗闪长岩; 12.地质界线; 13.角度不整合界线; 14.断裂; 15.采样点

图2 破城山一带地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the Pochengshan



Pl.斜长石; Qz.石英; Bi.黑云母

图3 破城山花岗闪长岩野外照片及正交偏光显微照片

Fig. 3 Outcrop and Microphotographs of granodiorites from Pochengshan

193 nm 准分子激光系统联用设备, 激光束斑直径为 32 μm, 激光能量设定为 80 mJ, 频率为 5 Hz。外部标样采用 91500, 元素含量校正分别以 NIST SRM 612 和 ²⁹Si 作为外标和内标。实验具体原理、步骤及数据处理参方法见参考文献(Yuan et al., 2004)。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

本次实验共选取 32 颗锆石作为样本, 每颗锆石

设置一个测点, 共计 32 个测点(表 1)。挑选出的锆石自形程度较高, 呈柱状, 长轴为 70~270 μm, 长宽比 2:1~4:1, 呈现出典型的岩浆振荡环带(图 4); 锆石 Th/U 值在 0.24~1.14(平均值为 0.51), 表明其属岩浆锆石成因(向浩予等, 2025; 魏博等, 2025; 赵文涛等, 2025)。锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 (447±4) Ma~(463±5) Ma, 加权平均年龄为 (451.4±1.9) Ma (MSWD = 1.6, n=32) (图 5)。表明该岩体的形成时代为晚奥陶世。

4.2 全岩主量、微量元素特征

破城山花岗闪长岩花岗闪长岩具有富硅(SiO₂=

表 1 破城山花岗闪长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Tab. 1 LA-ICP MS U-Pb data of granodiorites from Pochengshan

测点	含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
TW-1	387	876	0.44	0.056 0	0.001 6	0.561 5	0.015 8	0.072 2	0.000 7	454	67.59	453	10	449	4
TW-2	557	730	0.76	0.058 4	0.001 8	0.597 4	0.020 2	0.073 5	0.000 9	546	70.36	476	13	457	5
TW-3	326	677	0.48	0.055 7	0.001 6	0.560 9	0.016 4	0.072 4	0.000 7	439	62.96	452	11	450	4
TW-4	268	739	0.36	0.055 2	0.001 6	0.564 4	0.016 0	0.073 7	0.000 7	420	66.66	454	10	459	4
TW-5	344	848	0.41	0.056 1	0.001 6	0.560 0	0.016 0	0.071 8	0.000 6	454	62.96	452	10	447	4
TW-6	331	847	0.39	0.055 5	0.002 1	0.554 7	0.022 7	0.071 1	0.000 7	435	85.18	448	15	443	4
TW-7	275	1 124	0.24	0.055 0	0.002 0	0.553 6	0.019 5	0.072 6	0.000 6	413	84.25	447	13	452	4
TW-8	419	809	0.52	0.057 0	0.002 0	0.568 0	0.014 2	0.071 9	0.000 6	500	79.62	457	9	447	4
TW-9	243	506	0.48	0.056 7	0.001 9	0.563 1	0.017 9	0.071 8	0.000 6	483	74.07	454	12	447	4
TW-10	319	670	0.48	0.057 1	0.001 6	0.566 1	0.016 1	0.071 4	0.000 7	494	69.44	455	10	444	4
TW-11	319	421	0.76	0.056 8	0.003 2	0.577 0	0.018 6	0.073 5	0.000 8	483	122.21	463	12	457	5
TW-12	282	543	0.52	0.056 1	0.002 3	0.557 8	0.017 6	0.071 6	0.000 7	454	90.73	450	12	446	4
TW-13	291	592	0.49	0.058 1	0.001 8	0.578 7	0.016 6	0.071 8	0.000 7	532	66.66	464	11	447	4
TW-14	731	833	0.88	0.059 0	0.001 6	0.604 0	0.015 9	0.073 6	0.000 7	569	62.03	480	10	458	4
TW-15	399	839	0.48	0.059 7	0.004 2	0.591 4	0.037 8	0.073 9	0.000 8	594	150.75	472	24	460	5
TW-16	285	853	0.33	0.057 9	0.002 0	0.577 4	0.014 9	0.072 0	0.000 6	528	80.54	463	10	448	3
TW-17	380	828	0.46	0.058 7	0.001 7	0.586 3	0.017 2	0.072 0	0.000 6	567	60.18	469	11	448	4
TW-18	297	656	0.45	0.058 2	0.001 9	0.590 3	0.018 4	0.073 4	0.000 8	539	72.21	471	12	457	5
TW-19	408	746	0.55	0.059 6	0.002 6	0.587 0	0.018 7	0.071 6	0.000 7	591	91.65	469	12	446	4
TW-20	225	428	0.53	0.057 4	0.003 0	0.588 9	0.022 0	0.074 1	0.000 8	509	116.65	470	14	461	5
TW-21	368	689	0.53	0.057 0	0.001 8	0.569 5	0.017 5	0.072 1	0.000 7	494	63.88	458	11	449	4
TW-22	352	702	0.50	0.058 8	0.002 1	0.587 8	0.018 3	0.072 2	0.000 6	561	79.62	469	12	449	4
TW-23	595	974	0.61	0.056 8	0.001 9	0.569 5	0.018 0	0.072 6	0.000 7	483	78.70	458	12	452	4
TW-24	922	798	1.16	0.056 3	0.002 0	0.575 1	0.021 0	0.073 5	0.000 8	465	77.77	461	14	457	5
TW-25	346	883	0.39	0.060 8	0.002 9	0.618 3	0.016 9	0.074 4	0.000 9	632	101.84	489	11	463	5
TW-26	331	648	0.51	0.057 1	0.001 6	0.582 5	0.016 7	0.073 5	0.000 7	494	61.11	466	11	457	4
TW-27	390	816	0.48	0.056 7	0.001 5	0.574 7	0.014 2	0.073 2	0.000 6	480	89.80	461	9	455	4
TW-28	289	747	0.39	0.057 1	0.001 6	0.575 2	0.015 4	0.072 8	0.000 6	494	67.59	461	10	453	4
TW-29	338	606	0.56	0.057 8	0.001 6	0.591 3	0.016 3	0.073 8	0.000 7	524	61.10	472	10	459	4
TW-30	223	547	0.41	0.057 6	0.001 8	0.580 8	0.017 4	0.072 8	0.000 8	522	66.66	465	11	453	5
TW-31	478	976	0.49	0.055 1	0.002 1	0.554 5	0.014 0	0.072 2	0.000 6	417	83.33	448	9	449	4
TW-32	189	377	0.50	0.057 8	0.002 2	0.577 5	0.018 1	0.072 0	0.000 7	524	86.10	463	12	448	4

62.25%~69.6%)、铝(Al_2O_3 =14.34%~14.68%), 相对富钾贫钠(Na_2O =2.15%~2.58%, K_2O =3.69%~3.99%, $\text{K}_2\text{O}/$

Na_2O =1.47~1.86), 较低的镁(Mg =1.63%~2.67%)、钛(TiO_2 =0.38%~0.68%)、钙(CaO =2.1%~4.41%)含量的

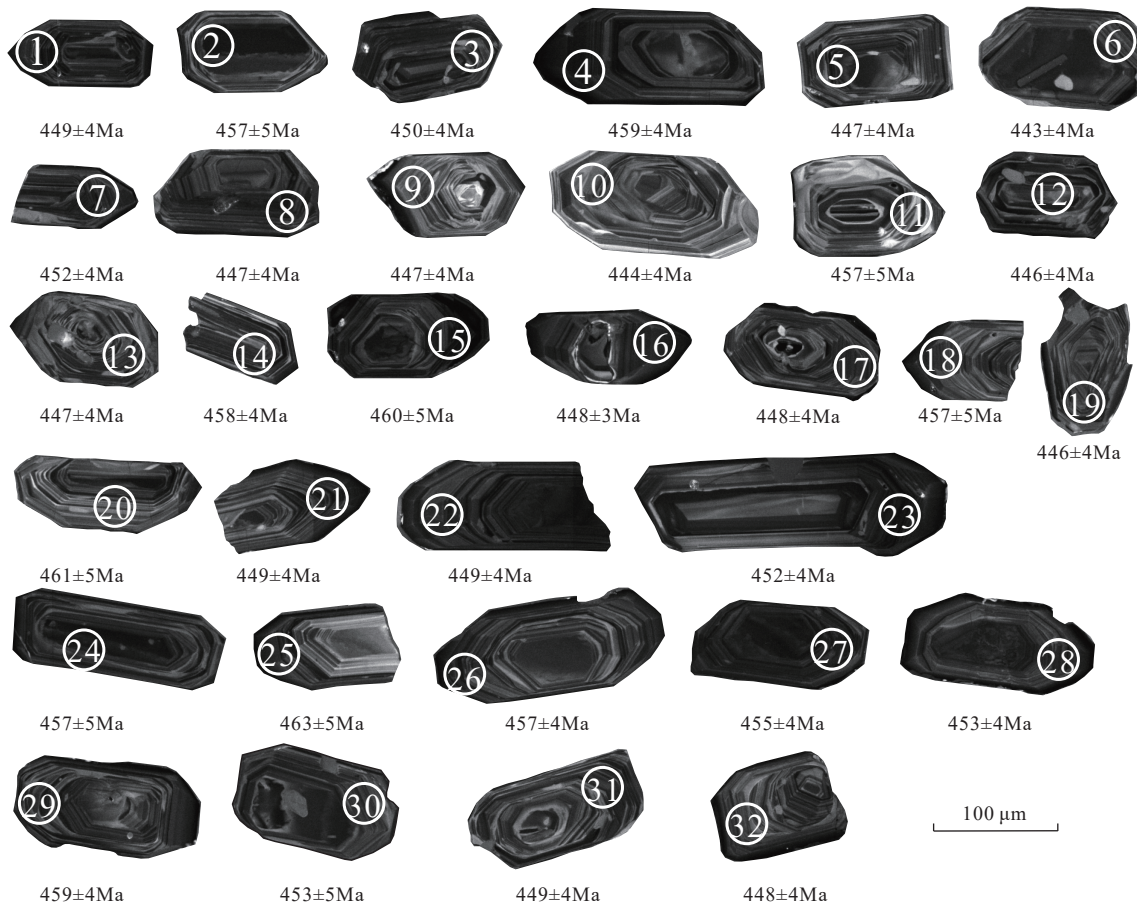


图4 破城山花岗闪长岩体锆石特征和 LA-ICP MS 测点位置

Fig. 4 Characteristics and dating spots of zircons of Pochengshan granodiorites

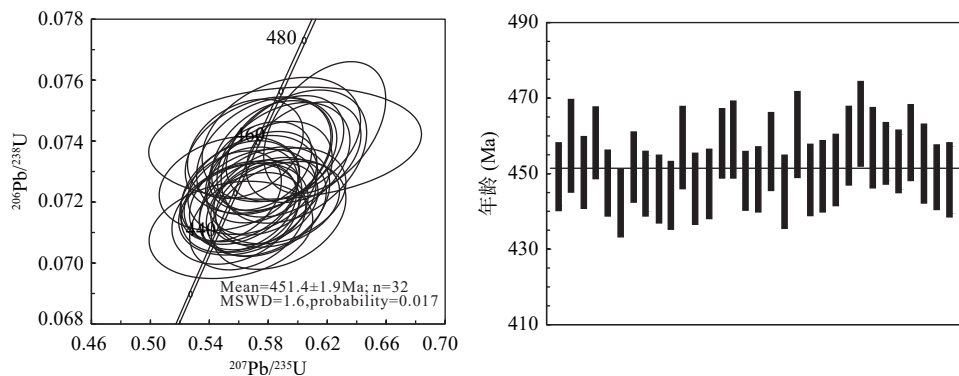


图5 破城山花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams of Pochengshan granodiorites

地球化学特征; A/CNK 为 0.91~1.17(平均值为 0.98), 为准铝质花岗岩(表 2)。在 A/CNK-A/NK 图解中样品主要落在准铝质区域(图 6a), 在 SiO_2 - K_2O 图解中样品落在高钾钙碱性系列区域(图 6b)。

破城山花岗闪长岩总稀土含量为 139.4×10^{-6} ~ 201.4×10^{-6} , $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 10.92~16.55, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值

为 4.03~4.69, δEu 值为 0.63~0.76(表 2)。在球粒陨石标准化配分模式图中(图 7a), 表现为轻稀土元素(LREE)强烈富集、重稀土元素(HREE)亏损的右倾型式以及弱的负铕异常特征。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 7b), 表现出大离子亲石元素(LILE, 如 Rb、Th、U、K 等)富集、高场强元素(HFSE, 如 Nb、Ta、Ti 等)

表 2 破城山花岗闪长岩主量(%)和微量元素(10^{-6})分析结果Tab. 2 Major (%) and trace (10^{-6}) element compositions of the Pochengshan granodiorites

样品编号	XQ-1	XQ-2	XQ-3	XQ-4
SiO ₂	62.25	64.45	63.16	69.6
TiO ₂	0.68	0.58	0.65	0.38
Al ₂ O ₃	14.6	14.37	14.68	14.34
Fe ₂ O ₃	1.93	2.42	2.36	1.64
FeO	3.33	2.07	2.77	1.47
MnO	0.09	0.08	0.09	0.05
MgO	2.66	2.21	2.67	1.63
CaO	4.41	4.31	4.25	2.1
Na ₂ O	2.15	2.36	2.50	2.58
K ₂ O	3.99	3.71	3.69	3.86
P ₂ O ₅	0.22	0.18	0.20	0.15
LOI	3.03	2.76	2.40	1.75
Total	99.34	99.5	99.42	99.55
Mg [#]	48.59	48.36	49.55	49.90
A/CNK	0.92	0.91	0.93	1.17
V	97	87.1	99.3	44.6
Cr	33	29.7	34.6	6.45
Co	13.6	11.6	13.5	5.91
Ni	10.4	9.04	9.54	3.67
Ga	21.3	19.9	20.6	24.6
Rb	169	112	161	150
Sr	278	263	274	279
Y	22.5	21.6	25.4	12.9
Zr	168.4	154.9	170.2	136.5
Nb	15	11.7	13.4	11.5
Cs	4.81	4.70	4.52	3.09
Ba	861	865	779	1 216
La	40.3	45	43.1	30.8
Ce	77.7	83.7	84.7	60.1
Pr	9.52	9.84	10.2	7.24
Nd	34.9	35.4	37.4	26.4
Sm	6.43	6.2	6.91	4.56
Eu	1.19	1.27	1.34	0.97
Gd	4.8	4.4	5.08	2.96
Tb	0.81	0.77	0.9	0.51
Dy	4.11	3.94	4.63	2.49
Ho	0.8	0.76	0.91	0.45
Er	2.34	2.28	2.71	1.28
Tm	0.37	0.37	0.44	0.21
Yb	2.31	2.24	2.66	1.25
Lu	0.33	0.32	0.38	0.18
Hf	4.8	4.3	4.7	4
Ta	1.68	1.34	1.53	1.38
Th	22.9	22	27	22.6
U	3.83	2.91	4.2	2.5
ΣREE	185.9	196.4	201.4	139.4
δEu	0.63	0.71	0.66	0.76
(La/Yb) _N	11.76	13.51	10.92	16.55
(La/Sm) _N	4.05	4.69	4.03	4.36
(Gd/Yb) _N	1.68	1.58	1.54	1.9
10 ⁴ ×Ga/Al	1.46	1.38	1.40	1.72

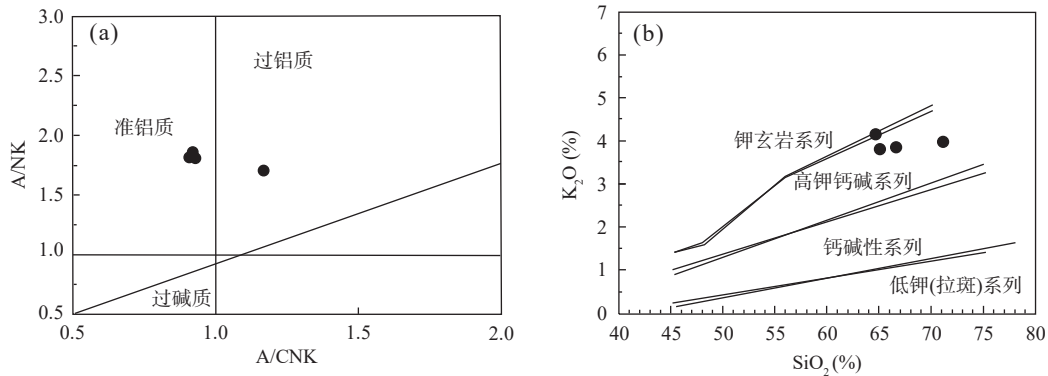


图6 A/CNK-A/NK 图解(a, 据 Shand, 1944)和 SiO_2 - K_2O 判别图解(b, 据 Peccerillo et al., 1976)

Fig. 6 (a) A/CNK-A/NK diagram and (b) SiO_2 - K_2O diagram

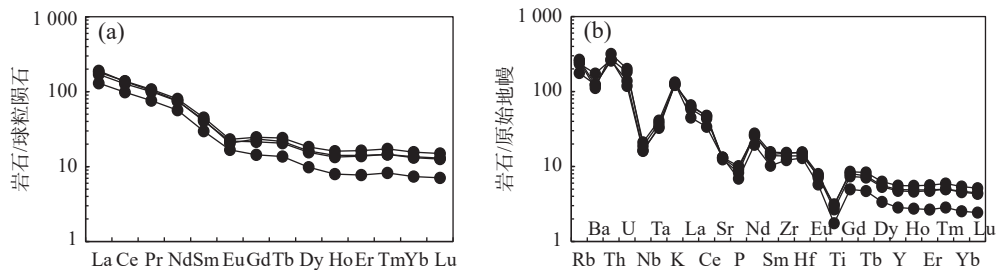


图7 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 (a) Trace element spider diagram and (b) Chondrite-normalized REE patterns

亏损的特征。

5 讨论

5.1 岩石成因

破城山花岗闪长岩的 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ (1.38~1.72) 低于典型 A 型花岗岩的值 (> 2.6 , Whalen et al., 1987), P_2O_5 含量较低 (0.15%~0.22%, 仅一个样品值为 0.22%), 且与 SiO_2 呈负相关关系, A/CNK 为 0.91~1.17 (除样品 XQ-4 外, 其余样品的 A/CNK < 1.1), 呈现 I 型花岗岩的部分特征。在 K_2O - Na_2O 图解中样品点均落在 S 型花岗岩区(图 8)。因此, 笔者认为破城山花岗闪长岩应属 S 型花岗岩, 兼具部分 I 型花岗岩特征。

破城山花岗闪长岩的 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素(LILE)富集, Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE)亏损, 轻稀土元素(LREE)相对重稀土元素(HREE)明显富集、轻重稀土分馏中等及弱铈异常特征的稀土配分特征, 显示出俯冲带岩浆作用的地球化学特征。岩石的 Nb/La 值为 0.26~0.37, 接近典型岛弧岩浆岩(约 0.3); Hf/Th 值为 0.18~0.21, 位于岛弧玄武岩 Hf/Th 值 (< 8) 的范围内(Condie, 1989)。在 R_1 - R_2 判别图解

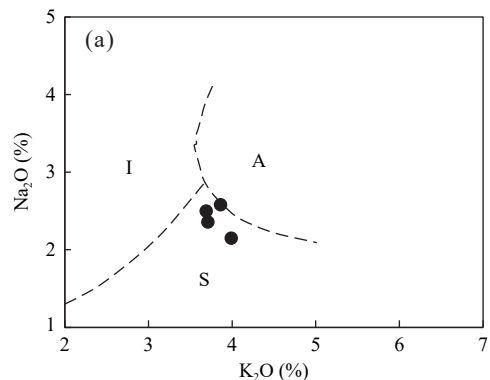
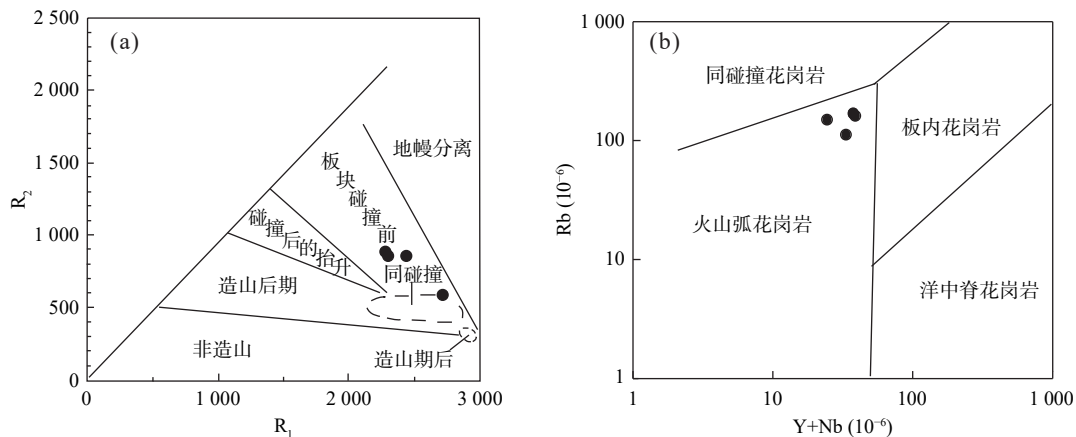


图8 花岗闪长岩成因类型判别图

Fig. 8 Discrimination diagram for petrogenetic types of granodiorite

(图 9a)和 Rb-(Y+Nb)判别图解中(图 9b), 全部破城山花岗闪长岩样品分别落入碰撞前区域、火山弧区域。柳园地区发现的 451 Ma 富 Nb 玄武岩(Mao et al., 2012)和 465 Ma 榴辉岩(Liu et al., 2011), 表明中奥陶世晚期北山地区处于洋壳俯冲阶段。因此, 破城山花岗闪长岩应为俯冲环境下活动大陆边缘弧岩浆作用的产物。

岩石具较高的 SiO_2 (62.25%~69.9%)、Yb (1.25~

图9 R_1 - R_2 (a)和 $(Y+Nb)$ - Rb (b)构造判别图(据 Batchelor et al., 1985)Fig. 9 (a) R_1 - R_2 and (b) $(Y+Nb)$ - Rb diagram

2.66, 平均值为 2.12×10^{-6}) 和 Y ($12.9 \sim 69.925.4$, 平均值为 20.6×10^{-6}), 较低的 MgO ($1.63\% \sim 2.67\%$), Ni ($3.67 \times 10^{-6} \sim 10.4 \times 10^{-6}$), Cr ($6.45 \times 10^{-6} \sim 34.6 \times 10^{-6}$) 含量; Nb/Ta 值 ($8.3 \sim 8.9$) 与近似于下地壳平均值 (8.3) (Rudnick et al., 2003), Zr/Nb 值 ($11.2 \sim 13.2$, 平均值为 12.3) 与大陆地壳 (16.2) 接近, La/Nb 值 ($2.7 \sim 3.9$, 平均值为 3.1) 与大陆地壳 (2.2) 和上地壳 (2.8) 相应值相近 (Saunders et al., 1988; Weaver, 1991); 蛛网图显示岩石相对富集 Zr 、 Hf , 亏损 Nb 、 Ta 、 P 、 Ti ; 这些地球化学特征指示破城山花岗闪长岩可能是下地壳部分熔融的产物 (Davies et al., 1987; Condie, 1989)。实验岩石学表明下地壳玄武质岩石部分熔融形成熔体的 $Mg^\#$ 值通常低于 40 (Rapp et al., 1991), 而破城山花岗闪长岩的 $Mg^\#$ 值为 $48.36 \sim 49.55$, 指示岩浆源区有幔源组分的加入 (郑荣国等, 2016; 张云等, 2019), 但较低的 MgO 、 Cr 、 Ni 含量说明幔源组分的加入较为有限。岩浆作用过程 (如部分熔融、分离结晶作用) 不会改 Nb/U , 但是在俯冲带脱水过程中, 大离子亲石元素 (LILE) 优先迁移至流体相, 大离子亲石元素 (LILE) 保留在金红石、钛铁矿等残留矿物中, 导致俯冲流体呈现较低的 Nb/U 值 (约 0.22), 破城山花岗闪长岩 Nb/U 值 ($3.19 \sim 4.60$), 远低于下地壳 (25), 指示其源区可能遭受了俯冲板片脱水形成的流体交代作用的影响 (张云等, 2019)。

综上所述, 在晚奥陶世俯冲环境下, 地幔楔受俯冲板片析出流体交代而发生部分熔融, 随后幔源岩浆上升底侵加热下地壳, 导致下地壳也发生部分熔融, 俯冲带流体对熔融岩浆进行了交代, 并伴有幔源组分加入, 壳源岩浆上侵并冷却凝固形成破城山花岗闪长岩。

5.2 构造背景

随着研究持续深入, 众多高精度测年数据将辉铜山-账房山蛇绿混杂岩中的辉长岩形成时间限定在 $362 \sim 446$ Ma, 红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩中的辉长岩、斜长花岗岩的形成时间限定在 $446 \sim 536$ Ma, 茆茆台子-小黄山蛇绿混杂岩中的辉长岩、玄武岩的形成时间限定在 $321 \sim 336$ Ma, 红石山-百合山-蓬勃山蛇绿混杂岩中的辉长岩、斜长花岗岩的形成时间限定在 $297 \sim 357$ Ma (王国强等, 2021)。高精度测年结果显示, 红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带存在目前中国境内古亚洲洋报道的最老年龄, 即早寒武世。红柳河-牛圈子-洗肠井-月牙山蛇绿混杂岩带南侧柳园地区发现的 451 Ma 富 Nb 玄武岩 (Mao et al., 2012) 和 465 Ma 榴辉岩 (Liu et al., 2011), 表明古亚洲洋在中奥陶世发生了南向俯冲; 其北侧发现的形成于岛弧环境的破城山花岗闪长岩 (451.4 ± 1.9) Ma、石板井地区石英闪长岩 (464 Ma)、高镁闪长岩 (456 Ma) (专少鹏等, 2018), 指示古亚洲洋在中奥陶世发生南北双向俯冲。志留纪期间, 北山洋盆存在大规模双向俯冲作用 (戴霜等, 2003), 向北俯冲于马鬃山地块之下, 造就了马鬃山弧 (公婆泉-东七一山弧) (图 10), 红柳河北、星星峡、骆驼圈、伊哈托里、大狐狸山等地与俯冲作用相关岩浆岩 ($425 \sim 441$ Ma) 的发现 (李伍平等, 2001b; 王国强, 2015), 佐证了这一观点; 向南俯冲至敦煌地块之下, 形成花牛山岩浆弧 (图 10), 且一直持续到早志留世晚期 (李小菲等, 2015)。北山地区发现的后碰撞花岗岩 (早泥盆世) 及侵入红柳河蛇绿岩中的花岗岩 (年龄为 404.8 ± 5.2 Ma), 共同指示红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩所代表的古亚洲洋在早泥

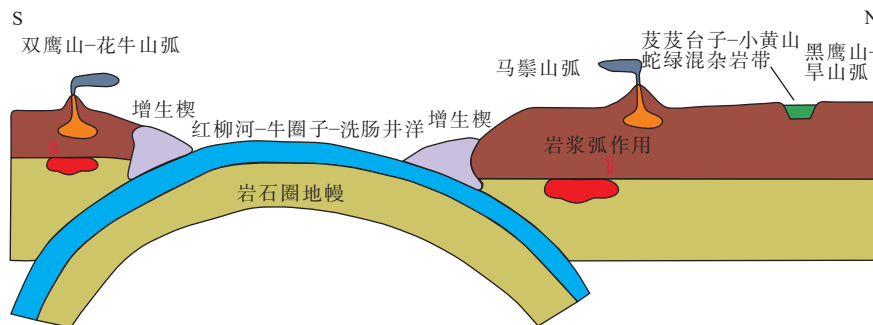


图10 甘肃北山花牛山-双鹰山弧及马鬃山弧地区中奥陶世—志留纪构造演化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the tectonic evolution from the Middle Ordovician to Silurian in the Huaniushan-Shuangyingshan arc and Mazongshan arc areas of Beishan, Gansu Province

盆世之前已经闭合。

6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石原位 U-Pb 定年结果将破城山花岗闪长岩年龄限定在 (451.4 ± 1.9) Ma (中奥陶世)。岩石具高钾钙碱性、准铝质 S 型花岗岩的地球化学特征, 同时兼具部分 I 型花岗岩特征。研究认为花岗闪长岩形成于俯冲环境, 是幔源岩浆底侵加热下地壳导致的下地壳部分熔融的直接产物, 同时岩浆源区经历了俯冲带流体的交代作用和幔源组分的混合。

(2) 形成于火山弧环境的破城山花岗闪长岩的发现, 为柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿混杂岩带所代表的古亚洲洋在晚奥陶世发生南北双向俯冲提供了岩石学和年代学依据。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献 (References):

- 陈阳阳, 段俊, 徐刚, 等. 甘肃北山地区晚三叠世煌斑岩地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 78-94.
- CHEN Yangyang, DUAN Jun, XU Gang, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Late Triassic Lamprophyre in the Beishan Region, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 78-94.
- 戴霜, 方小敏, 张翔, 等. 北山中部地区闪长岩-花岗岩类成因及构造背景[J]. 兰州大学学报, 2003, 39(1): 86-92.
- DAI Shuang, FANG Xiaomin, ZHANG Xiang, et al. The origin and

tectonic settings of diorite granitoid in the centre of Beishan Region of Gansu[J]. Journal of Lanzhou University, 2003, 39(1): 86-92.

黄博涛, 王国强, 卜涛, 等. 甘肃北山野马大泉志留纪花岗岩的成因和构造意义[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 3993-4005.

HUANG Botao, WANG Guoqiang, BU Tao, et al. Petrogenesis and Tectonic Significance of Silurian Granites in Yemadaquan Area, Beishan, Gansu Province[J]. Earth Science, 2021, 46(11): 3993-4005.

江思宏, 聂凤军. 北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约[J]. 地质学报, 2006, 80(6): 826-842.

JIANG Sihong, NIE Fengjun. Nd-isotope constrains on origin of granitoids in Beishan Mountain area[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(6): 826-842.

李勉, 王涛, 童英, 等. 北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造演化意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(5): 407-422.

LI Shan, WANG Tao, TONG Ying, et al. Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan area of Beishan and its implications to tectonic evolution[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(5): 407-422.

李勉, 王涛, 童英, 等. 北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 3055-3070.

LI Shan, WANG Tao, TONG Ying, et al. Zircon U-Pb age, origin and its tectonic significances of Huitongshan Devonian K-feldspar granites from Beishan orogeny, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(10): 3055-3070.

李小菲, 张成立, 李雷, 等. 甘肃北山明舒井岩体形成年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2521-2538.

LI Xiaofei, ZHANG Chengli, LI Lei, et al. Formation age, geochemical characteristics of the Mingshujing pluton in Beishan area of Gansu Province and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(9): 2521-2538.

- 李敏, 辛后田, 田健, 等. 北山造山带公婆泉岩浆弧的组成、时代及其大地构造意义[J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2393–2412.
- LI Min, XIN Houtian, TIAN Jian, et al. Composition, Age and Polarity of Gongpoquan Arc and Its Tectonic Significance in Beishan Orogen[J]. Earth Science, 2020, 45(7): 2393–2412.
- 李伍平, 王涛, 李金宝, 等. 东天山红柳河地区海西期花岗岩的岩石学、地球化学及其构造环境[J]. 地质论评, 2001a, 47(4): 368–376.
- LI Wuping, WANG Tao, LI Jinbao, et al. Petrology, Geochemistry of Hercynian Granites of Hongliuhe Area and Its Tectonic Setting in Eastern Tianshan Mountains, West China[J]. Geological Review, 2001a, 47(4): 368–376.
- 李伍平, 王涛, 李金宝, 等. 东天山红柳河地区晚加里东期花岗岩类岩石锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 2001b, 22(3): 231–235.
- LI Wuping, WANG Tao, LI Jinbao, et al. The U-Pb Age of Zircon from Late Caledonian Granitoids in Hongliuhe Area, East Tianshan Mountains, Northwest China and Its Geological Implications[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001b, 22(3): 231–235.
- 刘明强, 王建军, 代文军, 等. 甘肃北山造山带红石山地区正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩类岩石的成因及其地质意义[J]. 地质通报, 2005, 24(9): 831–836.
- LIU Mingqiang, WANG Jianjun, DAI Wenjun, et al. Genesis and geological significance of positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ granitoids in the Hongshishan area in the Beishan orogenic belt, Gansu, China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(9): 831–836.
- 刘明强. 甘肃北山造山带红石山地区埃达克质花岗岩类的发现及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(3): 232–238.
- LIU Mingqiang. Geochemical characteristics and geological significance of adakitic granitoids in Hongshishan area of the Beishan orogenic belt, Gansu Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(3): 232–238.
- 刘生荣, 罗新刚, 唐小平. 基于多源数据融合的东天山-北山成矿快速选区方法研究[J]. 西北地质, 2025, 58(6): 196–207.
- LIU Shengrong, LUO Xingang, TANG Xiaoping. A Rapid Target Selection Method for the Metallogeny in East Tianshan-Beishan Region Based on Multi-Source Data Fusion[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(6): 196–207.
- 吕鑫, 于晓飞, 杜泽忠, 等. 甘肃北山南带晚泥盆世岩浆事件: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素体系约束[J]. 岩石学报, 2022, 38(3): 693–712.
- LU Xin, YU Xiaofei, DU Zezhong, et al. Late Devonian magmatic event in the South Beishan orogenic belt, Gansu: Constraints from zircon U-Pb chronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(3): 693–712.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 北山柳园地区中志留世埃达克质花岗岩类及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 584–596.
- MAO Qigui, XIAO Wenjiao, HAN Chunming, et al. Discovery of Middle Silurian adakite granite and its tectonic significance in Liuyuan area, Beishan mountains, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 584–596.
- 孙新春, 王怀涛, 李通国, 等. 甘肃北山双峰山花岗闪长岩锆石 LA-ICP MS 定年及其构造意义[J]. 岩石矿物杂志, 2021, 40(2): 171–184.
- SUN Xinchun, WANG Huaitao, LI Tongguo, et al. LA-ICP MS zircon U-Pb ages of the granodiorites from Shuangfengshan in Beishan, Gansu Province and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2021, 40(2): 171–184.
- 王必任, 滕超, 白相东, 等. 北山造山带尖山子新元古代早期似斑状花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 44–57.
- WANG Biren, TENG Chao, BAI Xiangdong, et al. Age, Geochemistry and Geological Significance of an Early Neoproterozoic Porphyritic Granite in the Jianshanzi Area of the Beishan Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 44–57.
- 王国强. 北山古生代蛇绿岩、火山岩研究与构造演化[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- WANG Guoqiang. The research of the Paleozoic ophiolites and volcanic rocks and the tectonic evolution in the Beishan area (northwest China)[D]. Xi'an Chang'an University, 2015.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 北山造山带古生代蛇绿混杂岩研究现状及进展[J]. 地质通报, 2021, 40(1): 71–81.
- WANG Guoqiang, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Research status and progress of Paleozoic ophiolites in Beishan orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(1): 71–81.
- 魏博, 齐琦, 王利伟, 等. 塔里木西南缘晚志留世辉绿岩 U-Pb 锆石年龄、地球化学及其地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 288–301.
- WEI Bo, QI Qi, WANG Liwei, et al. U-Pb Zircon Age, Geochemistry and Geological Significance of the Late Silurian Diabase in the Southwest Margin of Tarim[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 288–301.
- 武磊, 翟新伟, 王二腾, 等. 北山地区芨芨台子蛇绿岩地球化学特征及形成环境[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 27–42.
- WU Lei, ZHAI Xinwei, WANG Erteng, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of the Jijitai Zhi Ophiolite in Beishan area[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 27–42.
- 辛后田, 牛文超, 田健, 等. 内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化[J]. 地质通报, 2020, 39(9): 1297–1316.
- XIN Houtian, NIU Wenchao, TIAN Jian, et al. Spatio-temporal structure of Beishan orogenic belt and evolution of Paleo-Asian Ocean, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(9): 1297–1316.
- 向浩予, 刘松, 康波, 等. 班公湖-怒江成矿带西段白板地北部晚

- 侏罗世花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄、微量元素组成及地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 43-51.
- XIANG Haoyu, LIU Song, KANG Bo, et al. Geochronology and Trace Element Compositions of Zircon in Granodiorite in North Baibandi Area, Western Bangong-Nujiang Metallogenic Belt and Their Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 43-51.
- 杨合群, 李英, 李文明, 等. 北山花岗岩 S 型/I 型空间变化规律及含矿性[J]. 地球学报, 2009, 30(5): 627-633.
- YANG Hequn, LI Ying, LI Wenming, et al. Spatial Variation Regularity and Ore Potential of S-type and I-type Granites in the Beishan Mountain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 22(2): 534-553.
- 杨建国, 谢春林, 王小红, 等. 甘肃北山地区基本构造格局和成矿系列特征[J]. 地质通报, 2012, 31(2-3): 422-438.
- YANG Jianguo, XIE Chunlin, WANG Xiaohong, et al. Basic tectonic framework and features of metallogenic series in Beishan area, Gansu Province[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(2-3): 422-438.
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 等. 1 北山地区早古生代板块构造特征[J]. 地质科学, 1990, (4): 305-314+411.
- ZUO Guochao, ZHANG Shuling, HE Guoqi, et al. Early Paleozoic Plate Tectonics in Beishan Area[J]. Scientia Geologica Sinica, 1990, (4): 305-314+411.
- 赵泽辉, 郭召杰, 王毅. 甘肃北山柳园地区花岗岩类的年代学、地球化学特征及构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1847-1860.
- ZHAO Zehui, GUO Zhaojie, WANG Yi, et al. Geochronology, Geochemical Characteristics and Tectonic Implications of the Granitoids from Liuyuan Area, Beishan, Gansu Province, Northwest China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1847-1860.
- 赵文涛, 王雁鹤, 李健, 等. 宗务隆构造带东段宗务隆群碎屑锆石年代学及其构造意义[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 123-139.
- ZHAO Wentao, WANG Yanhe, LI Jian, et al. Detrital Zircon Geochronology of the Zongwulong Group in the Eastern Segment of the Zongwulong Tectonic Belt and Its Tectonic Significance[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 123-139.
- 查显锋, 黄博涛, 罗克勇, 等. 北山造山带南缘潘家井子二叠纪弧岩浆岩的识别及构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 58-77.
- ZHA Xianfeng, HUANG Botao, LUO Keyong, et al. Identification of the Permian Arc-Related Magmatic Rocks and Its Significance in Panjiayingzi Area, Southern Margin of Beishan Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 58-77.
- 张文, 冯继承, 郑荣国, 等. 甘肃北山音凹峡南花岗岩体的锆石 LA-ICP MS 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1649-1661.
- ZHANG Wen, FENG Jicheng, ZHENG Rongguo, et al. LA-ICP MS Zircon U-Pb Ages of the Granites from the South of Yin'aomia and Their Tectonic Significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1649-1661.
- 张云, 孙立新, 张天福, 等. 内蒙古狼山北部早古生代岩浆岩年代学、地球化学特征及构造意义[J]. 地球科学, 2019, 44(1): 179-192.
- ZHANG Yun, SUN Lixin, ZHANG Tianfu, et al. Geochronology, geochemistry and its tectonic significance of the early Paleozoic magmatic rocks in northern Langshan, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 2019, 44(1): 179-192.
- 朱江. 北山造山带南带构造岩浆建造与金多金属成矿[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- ZHU Jiang. Tectono-magmatic formation and gold-polymetallic mineralization in south Beishan area, NW China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- 朱江, 吕新彪, 彭三国, 等. 甘肃北山小西弓金矿区石英正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 2015, 34(8): 1460-1469.
- ZHU Jiang, LU Xinbiao, PENG Sanguo, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of the quartz syenite porphyry in the Xiaoxigong gold deposit and their geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(8): 1460-1469.
- 郑荣国, 吴泰然, 肖文交, 等. 北山北部双井子复式岩体年代学、地球化学及其大地构造意义[J]. 地质学报, 2016, 90(11): 3153-3172.
- ZHENG Rongguo, WU Tairan, XIAO Wenjiao, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of the Shuangjizi composite pluton in the northern Beishan[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(11): 3153-3172.
- 专少鹏, 陈超, 申宗义, 等. 北山地区早古生代洋盆俯冲记录——来自石板井高镁闪长岩的年代学、地球化学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(4): 533-546.
- ZHUAN Shaopeng, CHEN Chao, SHEN Zongyi, et al. Early Paleozoic subduction of the ocean in Beishan region: Zircon U-Pb geochronological and geochemical evidence from the high-Mg diorite in the Shibanjing area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(4): 533-546.
- Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multi-cationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48: 43-55.
- Condie K C. Geochemical Changes in Basalts and Andesites Across the Archean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance[J]. Lithos, 1989, 23(1): 1-18.
- Davies GR and Macdonald R. Crustal influences in the Petrogenesis of the Naivasha Basalt-Comendite Complex: Combined Trace Element and Sr-Nd-Pb Isotope Constraints[J]. J Petrol, 1987,

- 28(6): 1009–1031.
- He Z Y, Klemd R, Yan L L, et al. The Origin and Crustal Evolution of Microcontinents in the Beishan Orogen of the Southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 1–14.
- Liu X M, Chen B L, Jahn B M, et al. Early Paleozoic (ca. 465 Ma) eclogites from Beishan (NW China) and their bearing on the tectonic evolution of the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(4): 715–731.
- Mao Q H, Xiao W J, Fang T H, et al. Late Ordovician to early Devonian adakites and Nb enriched basalts in the Liuyuan area, Beishan, NW China: Implications for early Paleozoic slab-melting and crustal growth in the southern Altaids[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 534–553.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean granulites and tonalities[J]. *Precambrian Research*, 1991, 51: 1–25.
- Rudnick R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of trondhjemites and tonalities[J]. *Precambrian Research*, 2003, 51: 1–25.
- Shand S J. *Eruptive Rocks. (Scientific Books: Eruptive Rocks, Their Genesis, Composition, and Classification, with a Chapter on Meteorites)*[J]. *Science*, 1944, 99: 101–102.
- Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints[J]. *Journal of Petrology*, 1988, (1): 415–445.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- Song D F, Xiao W J, Han C M, et al. Geochronological and geochemical study of gneiss-schist complexes and associated granulites, Beishan orogen, southern Altaids[J]. *International Geology Review*, 2013a, 55(14): 1705–1727.
- Song D F, Xiao W J, Han C M, et al. Progressive accretionary tectonics of the Beishan orogenic collage, southern Altaids: insights from zircon U-Pb and Hf isotopic data of high-grade complexes[J]. *Precambrian Research*, 2013b, 227: 368–388.
- Song D F, Xiao W J, Windley B F, et al. A paleozoic Japan-type subduction accretion system in the Beishan orogenic collage, southern central Asian orogenic belt[J]. *Lithos*, 2015, 224–225: 195–213.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407–419.
- Weaver B L. The Origin of Ocean Island Basalt End-member Compositions: Trace Element and Isotopic Constraints[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1991, 104(2–4): 381–397.
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(10): 1553–1594.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(3): 353–370.
- Zheng R G, Xiao W J, Li J Y, et al. A Silurian-early Devonian slab window in the southern central Asian orogenic belt: evidence from high-Mg diorites, adakites and granulites in the western central Beishan region, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 153: 75–99.