



引文格式: 董美玲, 滕超, 杨欣杰, 等. 北山造山带南部早古生代歪咀山岩体的年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 121-142. DOI: 10.12401/j.nwg.2025097

Citation: DONG Meiling, TENG Chao, YANG Xinjie, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Early Paleozoic Waizuishan Pluton in the Southern Beishan Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 121-142. DOI: 10.12401/j.nwg.2025097

北山造山带南部早古生代歪咀山岩体的年代学、地球化学特征及地质意义

董美玲¹, 滕超^{1,*}, 杨欣杰¹, 王必任², 曹军¹, 陈喜庆¹, 邵杰¹, 张晓飞³, 李树才¹

(1. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201; 2. 防灾科技学院地球科学学院, 河北 三河 065201; 3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 北山造山带位于中亚造山带南缘中段, 经历了长期多阶段的俯冲、拼贴, 是记录中亚造山带南缘构造演化与古亚洲洋闭合的重要区域。早古生代是北山造山带重要的地壳演化时期, 岩浆活动频繁, 前人的报道多集中在北山造山带的中西部, 岩浆活动峰值为 450~420 Ma。笔者以北山造山带双鹰山-花牛山构造单元东南缘的歪咀山岩体为研究对象, 开展系统的年代学及地球化学研究。歪咀山岩体主要由石英闪长岩和花岗闪长岩组成, 锆石 U-Pb 年龄为 (427.1±3.4) Ma 和 (418.6±2.8) Ma。岩石属于准铝质系列 ($A/CNK < 1$), 显示钙碱性和镁质特征。岩石稀土元素总量较低, 富集轻稀土元素, 具有较弱的负 Eu 异常 ($\delta Eu = 0.72 \sim 0.86$), 富集 Rb、Th、U、K、Pb 等大离子亲石元素 (LILEs), 亏损 Nb、Ta、P、Zr、Ti 等高场强元素 (HFSEs)。锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -2.0~0.6, 对应的 Hf 同位素地壳模式年龄为 1.53~1.36 Ga。地球化学特征显示歪咀山岩体属于 I 型花岗岩, 为形成于俯冲构造环境下的大陆边缘火成岩弧, 主要来源于中元古代地壳物质的重熔, 并有少量幔源物质的贡献。北山造山带 4 个构造单元存在几乎同期的岩浆活动, 古生代岩浆岩 (500~350 Ma) 锆石 Hf 模式年龄具有 1.5~1.4 Ga 和 0.8~1.0 Ga 的峰值, 与中元古代~1.4 Ga 和新元古代~0.9 Ga 两期构造热事件记录相对应, 说明北山造山带各构造单元可能具有统一的来源。通过北山造山带与伊犁地块、中天山地块的对比, 推断三者可能与波罗的克拉通和劳伦克拉通更具亲缘性, 而与以敦煌地块为代表的塔里木克拉通不具亲缘性。

关键词: 北山造山带; 早古生代; 歪咀山岩体; 年代学; 地球化学

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0121-22

Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Early Paleozoic Waizuishan Pluton in the Southern Beishan Orogenic Belt

DONG Meiling¹, TENG Chao^{1,*}, YANG Xinjie¹, WANG Biren², CAO Jun¹, CHEN Xiqing¹,

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-06-03; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目 (GC20231205-3、DD20221814、DD20160010) 联合资助。

作者简介: 董美玲 (1986-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事基础地质调查与研究。E-mail: dml_happy@126.com。

* 通讯作者: 滕超 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事基础地质调查与研究。E-mail: 275498009@qq.com。

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

SHAO Jie¹, ZHANG Xiaofei³, LI Shucui¹

(1. Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. School of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China; 3. Development and Research Centre, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

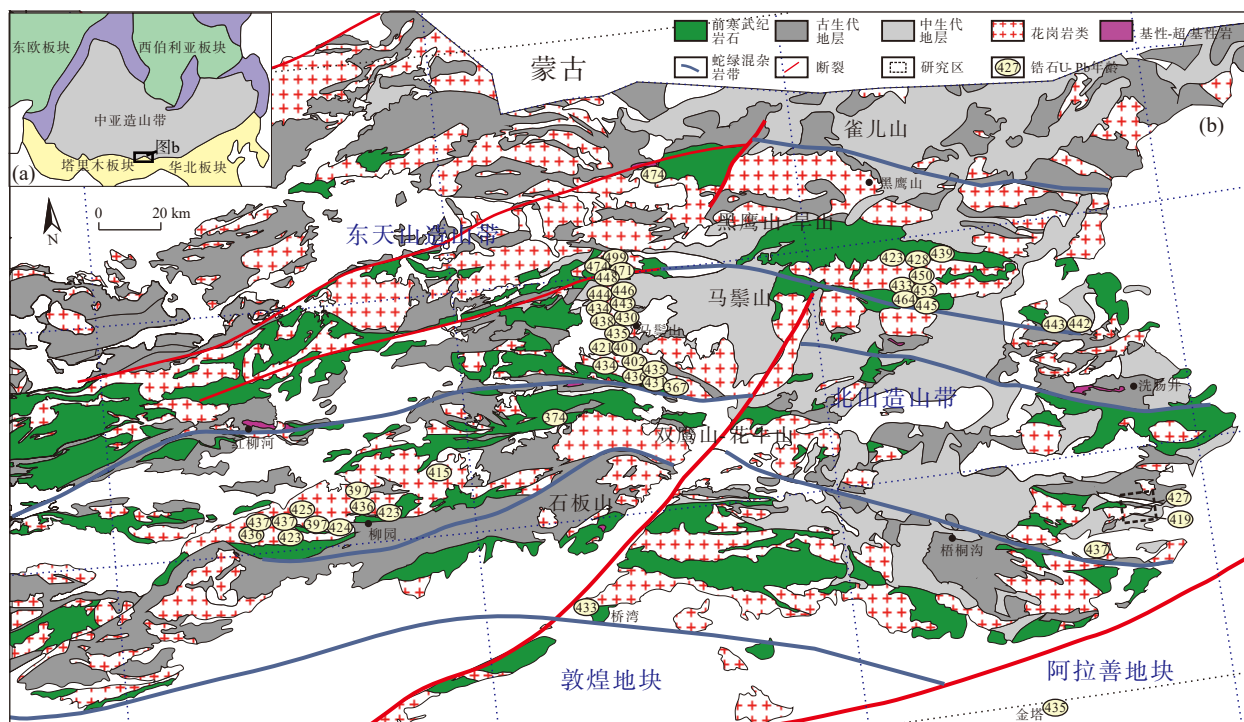
Abstract: The Beishan Orogenic Belt, situated in the central segment of the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB), has undergone prolonged, multi-stage subduction and accretion. It represents a key region for reconstructing the tectonic evolution of the southern CAOB margin and the closure of the Paleo-Asian Ocean. The Early Paleozoic was a significant crustal evolution period for the Beishan Orogenic Belt, characterized by frequent magmatic activity. Previous studies primarily focused on the central-western part of the belt, reporting a magmatic flare-up at 450–420 Ma. This study presents systematic geochronological and geochemical investigations of the Waizuishan pluton, located on the southeastern edge of the Shuangyingshan-Huaniushan tectonic unit within the Beishan Orogenic Belt. The Waizuishan pluton mainly comprises quartz diorite (and granodiorite). Zircon U-Pb dating yielded crystallization ages of (427.1 ± 3.4) Ma and (418.6 ± 2.8) Ma. The rocks belong to the metaluminous series ($A/CNK < 1$), exhibiting calc-alkaline and magnesian affinities. They possess low total rare earth element (ΣREE) contents, are enriched in light rare earth elements (LREEs), and show weak negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.72 - 0.86$). Geochemically, they are enriched in large-ion lithophile elements (LILEs: e.g., Rb, Th, U, K, Pb) and depleted in high-field-strength elements (HFSEs: e.g., Nb, Ta, P, Zr, Ti). Zircon $\epsilon Hf(t)$ values range from -2.0 to 0.6 , corresponding to Hf crustal model ages (T_{DMC}) of $1.53 - 1.36$ Ga. The geochemical signatures indicate that the Waizuishan pluton is an I-type granite formed within a subduction-related continental margin igneous arc. It was derived predominantly from the remelting of Mesoproterozoic crustal material with minor contributions from mantle-derived components. Nearly contemporaneous magmatism occurred within all four tectonic units of the Beishan Orogenic Belt. Zircon Hf model ages from Paleozoic igneous rocks (500–350 Ma) exhibit prominent peaks at $1.5 - 1.4$ Ga and $0.8 - 1.0$ Ga, correlating with Mesoproterozoic (~ 1.4 Ga) and Neoproterozoic (~ 0.9 Ga) tectonothermal events. This suggests that the various tectonic units of the Beishan Orogenic Belt likely share a common source region. Comparisons with the Yili Block and Central Tianshan Block indicate that these three terranes show stronger affinities with the Baltica and Laurentia cratons, whereas they lack affinity with the Tarim Craton, as represented by the Dunhuang Block.

Keywords: Beishan Orogenic Belt; Early Paleozoic; Waizuishan pluton; geochronology; geochemistry

中亚造山带(CAOB)是位于东欧(波罗的)克拉通、西伯利亚克拉通、塔里木克拉通和华北克拉通之间的巨型造山拼贴体(图 1a),是古亚洲洋长期俯冲消减的产物,被认为是全球最大的显生宙大陆增生区,是大陆动力学和成矿作用研究的天然实验室,受到各国地球科学家的长期重视,并成为科学研究前沿与热点(肖文交等, 2019; 黄河等, 2024)。北山造山带位于中亚造山带南缘中段,经历了长期多阶段的俯冲、拼贴,是记录中亚造山带南缘构造演化与古亚洲洋闭合的重要区域(左国朝等, 2003; Xiao et al., 2018; He et al., 2018)。北山造山带岩浆活动频繁,不同规模、类型以及成因的岩浆岩广泛分布,出露面积超过总基岩面积的三分之一,反映了岩浆-热事件在地壳演化中的重

要作用(江思宏等, 2006; 杨合群等, 2006)。根据现已发表的精确锆石 U-Pb 定年结果,北山造山带的岩浆事件主要划分为 8 期,包括前寒武纪(~ 1.4 Ga、 ~ 0.9 Ga)、古生代(540~500 Ma, 480~430 Ma, 420~390 Ma, 370~360 Ma, 330~280 Ma)和早中生代(240~220 Ma)(李舫等, 2009, 2011; Mao et al., 2012; 卢进才等, 2013; 牛亚卓等, 2013; 苗来成等, 2014; 贺振宇等, 2014, 2015; He et al., 2018; 许伟等, 2018; 袁禹, 2019; 王怀涛, 2019; 孙海瑞等, 2020; 赵宏刚等, 2020; 李沅柏等, 2021; Wang et al., 2021a、2021b; 白荣龙等, 2022; 吕鑫等, 2022; 王浩等, 2022),这些岩浆事件记录了北山造山带各个时期的构造演化历史。

早古生代是北山造山带重要的地壳演化时期,岩



图中年龄数据来源见表1

图1 中亚造山带构造简图(a, 据孙海瑞等, 2020)和北山造山带地质简图(b, 据 Niu et al., 2018 和 He et al., 2018 修改)

Fig. 1 (a) Simplified tectonic map of the Central Asian Orogenic Belt and (b) simplified geological map of the Beishan Orogenic Belt

浆活动频繁, 由北往南岩浆岩多集中分布在黑鹰山—旱山单元的石板井地区(464~423 Ma)、马鬃山单元的马鬃山地区(499~401 Ma)、双鹰山—花牛山单元的柳园地区(437~415 Ma)、石板山单元的桥湾和金塔地区(435~433 Ma), 年龄峰值集中在 450~420 Ma (图 1b)。这些岩浆岩以花岗岩类为主, 多被认为是在与俯冲有关的构造背景下形成的(毛启贵等, 2010; 冯继承等, 2012; 贺振宇等, 2014; Song et al., 2015)。以上的早古生代岩浆岩报道多集中在北山造山带中西部, 而东南部报道较少, 笔者依托 1:5 万歪咀山幅区域地质调查成果, 选择北山造山带东南缘歪咀山岩体, 开展系统的岩石学、锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素和全岩元素地球化学分析研究, 并结合前人已发表的古生代岩浆岩数据资料, 探讨了北山造山带各构造单元的归属起源以及与相邻地块的构造亲缘性。

1 地质背景及样品特征

北山造山带位于中亚造山带南缘, 西侧与东天山造山带构造毗邻, 东向延伸部分被巴丹吉林沙漠覆盖, 继续向东过渡为阿拉善—兴蒙复合造山体系, 其南侧为隶属于塔里木克拉通东缘的敦煌地块, 北侧则与西

伯利亚克拉通南缘的蒙古弧增生带构造相接(图 1b; Xiao et al., 2010)。从构造格局来看, 该造山带以发育多组深大断裂为特征, 其构造线展布方向与区域地走向及邻区天山造山带、兴蒙褶皱带具有显著一致性, 均呈现近 EW 向构造格局。值得注意的是, 这些主干断裂带多沿蛇绿混杂岩带分布, 不仅构成了构造单元划分的重要边界, 同时作为深部物质上涌通道对区内岩浆—热液活动具有显著控制作用(图 1b)。北山造山带包括多个构造带及之间的构造单元, 从北向南构造单元包括雀儿山、黑鹰山—旱山、马鬃山、双鹰山—花牛山和石板山构造单元(Xiao et al., 2010; Niu et al., 2018; He et al., 2018; Wang et al., 2021b), 4 条蛇绿混杂岩带从北向南依次为红石山—百合山—蓬勃山蛇绿混杂岩带、芨芨台子—小黄山蛇绿混杂岩带、红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿混杂岩带、辉铜山—帐房山蛇绿混杂岩带(王国强等, 2021)。

研究区位于北山造山带南部的双鹰山—花牛山构造单元东南缘(图 1b), 出露的地层由老至新。太古宇—古元古界敦煌岩群以中—深变质碎屑岩夹大理岩组成变形强烈的有层无序岩群, 靠上部夹多层变质中基性火山岩。新元古界青白口系野马街组总体为一套碎屑岩夹灰岩、火山岩组合。下中奥陶统

表 1 北山造山带、伊犁地块、中天山地块古生代岩浆岩(500~350 Ma)侵位年龄

Tab. 1 Magmatic activities from Paleozoic occurred in the Beishan Orogenic Belt, Yili Block and Central Tianshan Block

构造单元	样品名	岩性	年龄 (Ma)	参考文献
黑鹰山-旱山单元	BS041	片麻状花岗岩	423	刘雪敏等 (2010)
	10SYQ07	眼球状片麻岩	499	Song et al. (2013)
	10SYQ08	糜棱岩化花岗岩	474	Song et al. (2013)
	10SYQ03	花岗片麻岩	471	Song et al. (2013)
	10SYQ05	糜棱岩化花岗岩	448	Song et al. (2013)
	X10-70-1-01	石板井糜棱岩化花岗岩	464	Yuan et al. (2018)
	X10-71-1-01	石板井糜棱岩化花岗岩	455	Yuan et al. (2018)
	X10-73-1-01	石板井闪长岩	450	Yuan et al. (2018)
	X10-69-1-10	石板井糜棱岩化花岗岩	445	Yuan et al. (2018)
	X10-77-1-01	石板井糜棱岩化花岗岩	439	Yuan et al. (2018)
	X10-72-1-03	石板井糜棱岩化花岗岩	433	Yuan et al. (2018)
	X10-77-2-01	石板井石英二长岩	428	Yuan et al. (2018)
	TW12	二长花岗岩	442	胡新苗等 (2024)
马鬃山单元	P7TW2	花岗闪长岩	443	胡新苗等 (2024)
	BS07-136	公婆泉花岗岩	402	郑荣国等 (2012)
	1122CL	白圪塔石英闪长岩	436	李小菲 (2013)
	1129HTJ	白圪塔二长花岗岩	435	李小菲 (2013)
	1131CG-6	白圪塔花岗闪长岩	431	李小菲 (2013)
	1132WG	马鬃山石英闪长岩	367	李小菲 (2013)
	X10-48-1	糜棱岩化花岗岩	446	Yuan et al. (2018)
	X10-49-1	糜棱岩化花岗岩	444	Yuan et al. (2018)
	X10-50-1	糜棱岩化花岗岩	443	Yuan et al. (2018)
	X10-54-1	糜棱岩化花岗岩	438	Yuan et al. (2018)
	X10-51-1	糜棱岩化花岗岩	434	Yuan et al. (2018)
	X10-52-1	糜棱岩化花岗岩	430	Yuan et al. (2018)
	BA11-87	石英闪长岩	435	Zheng et al. (2018)
	BA11-91	石英二长岩	421	Zheng et al. (2018)
	BA11-96	花岗岩	401	Zheng et al. (2018)
	BA11-118	花岗闪长岩	434	Zheng et al. (2018)
	BA11-130	花岗岩	402	Zheng et al. (2018)
双鹰山-花牛山单元	LY-2-55	辉铜山东二长花岗岩	397	赵泽辉等 (2007)
	LY-12-17	辉铜山东花岗岩闪长岩	423	赵泽辉等 (2007)
	LY-2-27	辉铜山东钾长花岗岩	436	赵泽辉等 (2007)
	TW-2	红脊山二长花岗岩	437	张新虎等 (2008)
	SF07	双峰山正长花岗岩	415	李舫等 (2009)
	B70823-8	辉铜山钾长花岗岩	397	李舫等 (2011)
	LYB19	辉铜山片麻状黑云母花岗岩	424	毛启贵等 (2010)
	08L05	柳园英安斑岩	374	Mao et al. (2012)
	10MZS04	黑云斜长片麻岩	374	Song et al. (2013)
	SJP-3R	拾金坡黑云母二长花岗岩	406	朱江 (2013)
	HTS-1	辉铜山钾长花岗岩	424	朱江 (2013)
	BST	白山堂流纹斑岩	375	朱江 (2013)
	XJ11-140	明舒井闪长岩	437	李小菲等 (2015)
	XJ11-143	明舒井花岗岩	436	李小菲等 (2015)
	PM019RZ1	黄草滩闪长岩	402	王疆涛等 (2016)

续表 1

构造单元	样品名	岩性	年龄 (Ma)	参考文献
双鹰山-花牛山单元	D0276RZ1	黄草滩花岗闪长岩	394	王疆涛等 (2016)
	XQD-TW	小泉东花岗闪长斑岩	396	王怀涛 (2019)
	HN4-1	花牛山石英闪长岩	363	王怀涛 (2019)
	TW6239-1	双峰山南黑云母二长花岗岩	368	吕鑫等 (2022)
	TW6237-3	双峰山南黑云母花岗闪长岩	366	吕鑫等 (2022)
	PM011-2	明舒井二长花岗岩	423	王红杰等 (2024)
	D0600-19	明舒井正长花岗岩	425	王红杰等 (2024)
	D3782-1	明舒井花岗闪长岩	438	王红杰等 (2024)
	PM115TW9	歪咀山石英闪长岩	427	本文
	TW8813	歪咀山花岗闪长岩	419	本文
石板山单元	X10-128-1-01	金塔钾长花岗岩	435	贺振宇等 (2014)
	X10-98-2-01	桥湾糜棱岩化花岗岩	433	贺振宇等 (2014)
伊犁地块	D1011	石英二长岩	446	Gou L L and Zhang L F (2016)
	D1021	石英二长岩	443	Gou L L and Zhang LF (2016)
	w8034	糜棱岩化二长岩	453	Gou L L and Zhang L F (2016)
	13ts15B	二长花岗岩	411	Zhong et al. (2017)
	TKSB14-1	花岗闪长岩	370	Huang et al. (2020)
	ZS21	二长花岗岩	362	Bao et al. (2018)
	ZS34	钾长花岗岩	360	Bao et al. (2018)
	ZS1-1	花岗闪长岩	485	徐学义等 (2010)
	KK1-1	黑云二长花岗岩	426	徐学义等 (2010)
	KK3-1	黑云母花岗岩	407	徐学义等 (2010)
	TL1-2	二长花岗岩	366	徐学义等 (2010)
	XXY1-1	花岗闪长岩	430	徐学义等 (2010)
中天山地块	782	钾长花岗岩	434	Ma et al. (2014)
	784	花岗闪长岩	451	Ma et al. (2014)
	638	片麻状花岗闪长岩	475	Ma et al. (2014)
	BDB-12	花岗闪长岩	432	黄河等 (2015)
	BLT02	花岗闪长岩	473	Shi et al. (2014)
	XSS1	黑云母花岗岩	458	Shi et al. (2014)
	XSS2	花岗岩	404	Shi et al. (2014)
	791	钾长花岗岩	366	Ma et al. (2014)
	TKST-11	黑云母花岗岩	362	黄河等 (2015)
	TS1342	二长花岗岩	362	Yin et al. (2016)
	12ts30-1	糜棱岩化钾长花岗岩	417	Zhong et al. (2015)
	XXX01	花岗岩	393	Shi et al. (2014)
	YSG12	花岗岩	399	Shi et al. (2014)

罗雅楚山组: 下部为泥质板岩, 中部为硅泥质板岩, 上部为灰黑色硅质岩。下石炭统红柳园组: 一段为浊流相+滨浅海相的砾岩、杂砂岩、泥岩、凝灰质砂岩; 二段为浅海相的中薄层结晶灰岩和钙泥质板岩; 三段为斜坡相+浅海相的凝灰质砂岩、板岩、砾岩以及安山岩; 一段和二段含珊瑚、腕足、海百合茎化石。下石炭统白山组: 一段为陆棚相的玄武岩及少量泥质粉砂岩, 二段为陆棚相的砂岩、粉砂岩及泥质板岩; 三段为浅海相的玄武岩、砂岩、粉砂岩和泥质板岩; 一段和二段含腕足碎片和海百合茎化石。上石炭统干泉组为一套火山岩夹沉积岩组合, 岩性主要为流纹质晶屑凝灰岩、英安岩、灰岩。下白垩统赤金堡组为冲积扇相-河道亚相粗砾岩和含砾粗砂岩。新生界以未固结砾岩、砂岩及第四纪冲洪积物为主。研究区岩浆活动具多期次特征。新元古代发育片麻状二长花岗岩; 早古生代发育以闪长岩-花

岗闪长岩为主的中酸性岩;晚古生代则发育镁铁-超镁铁质岩墙群(橄榄岩-辉长岩-辉绿岩组合)及高分异花岗岩类,各类岩脉穿插关系复杂。

歪咀山岩体(E 99°30'~99°43', N40°42'~40°46'),呈近 EW 向岩基产出,出露面积约为 80 km²(图 2)。岩体侵入敦煌岩群及新元古代片麻状花岗岩,中南部被早二叠世花岗闪长岩穿切,北部与下石炭统红柳园组呈角度不整合接触,南部被下白垩统赤金堡组不整合覆盖。岩体内广泛分布闪长质微粒包体(3~30 cm),

多呈椭圆状,包体与寄主岩接触界面清晰(图 3a)。歪咀山岩体岩性主要为石英闪长岩和花岗闪长岩,呈灰黑色,块状构造(图 3b)。石英闪长岩(Pm115YQ9),粗中粒结构,主要矿物组合为斜长石(65%)、钾长石(10%)、黑云母和角闪石(20%)、石英(5%)(图 3c、图 3e、图 3g)。花岗闪长岩(YQ8813),中细粒花岗结构,主要矿物组合为斜长石(50%)、钾长石(10%)、黑云母和角闪石(20%)、石英(20%)(图 3d、图 3f、图 3h)。副矿物组合为榍石、锆石、磷灰石和磁铁矿。

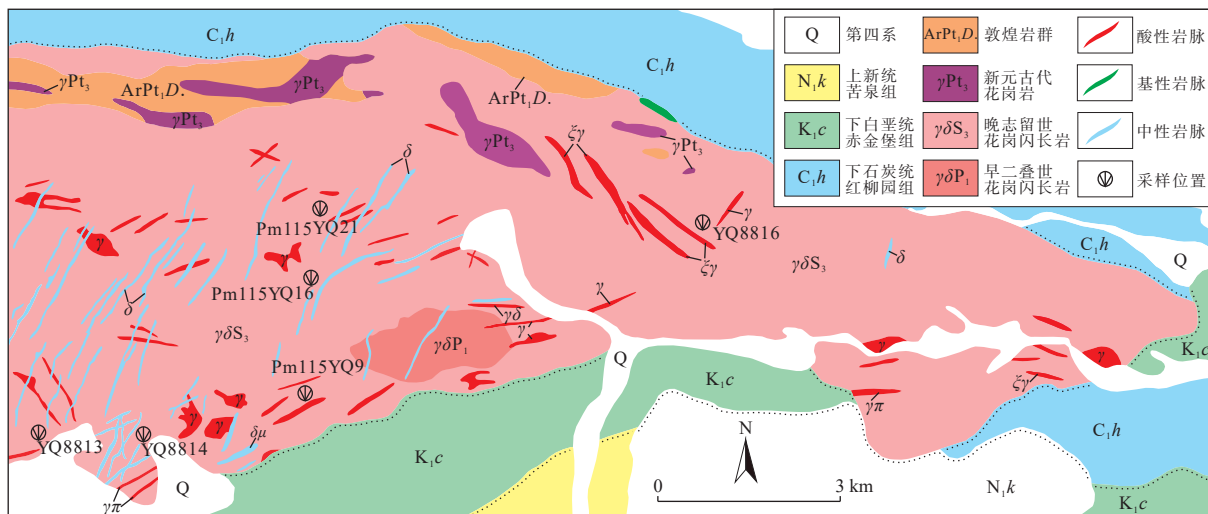


图2 歪咀山地区地质简图(据自然资源实物地质资料中心,2019 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Waizuishan Area

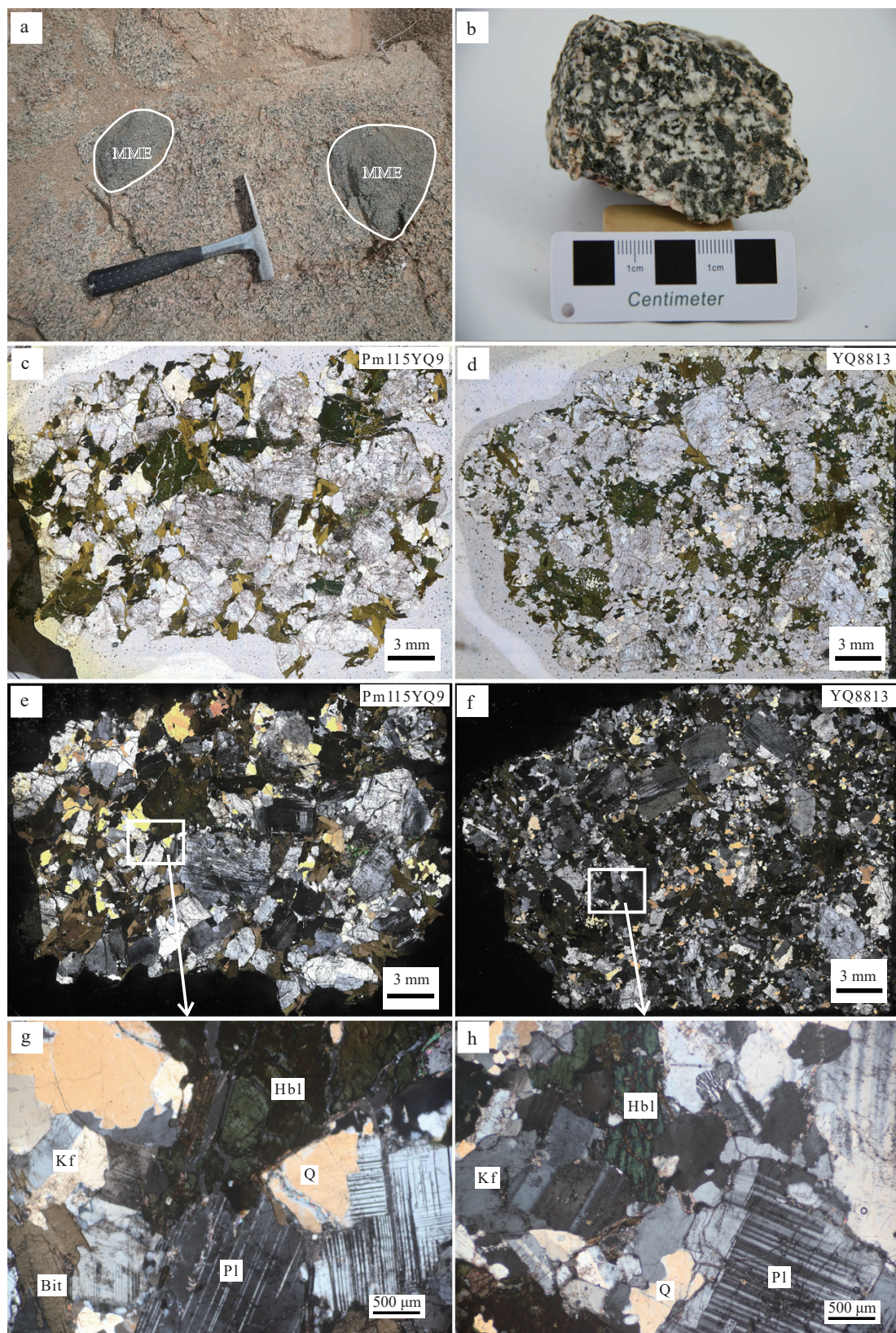
2 分析方法

岩相学观察与数字化成像在自然资源实物地质资料中心岩矿测试实验室完成。实验时采用 SCUXT-P 型显微图像多技术采集系统开展全视域高分辨率数字成像,实验流程包括:①系统参数设置:物镜放大倍数 5×,采集角度 0°,实现薄片样品的亚微米级分辨率采集;②偏振光显微成像:分别在单偏光(PPL)和正交偏光(XPL)模式下进行分视域图像采集;③图像融合处理:通过全薄片多角度图像自动采集系统完成视域拼接,最终获取整片薄片的 PPL 和 XPL 全视域数字图像(分辨率达 0.5 μm/pixel)(苏桂芬等,2017)。为确保岩矿测试分析的准确性,笔者所选取的主微量及锆石定年测试样品均不包含包体。

全岩主微量元素测试由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。主量元素采用 X-射线荧光光谱分析法(XRF)进行测定,所用仪器为日本理学

Primus I X 射线荧光光谱仪;微量元素采用电感耦合等离子体-质谱法(ICP-MS)进行测定,所用仪器为 Agilent 7700e 型电感耦合等离子体质谱仪;分析精度均优于 5%。

锆石制靶、锆石阴极发光图照相和锆石 U-Pb 年龄测试均在中国地质调查局天津地质调查中心实验室测试完成。参照锆石阴极发光图像,重点选择锆石的环带部分进行 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年,测试仪器为 Agilent 7500a。实验采用的激光束斑直径为 35 μm,以氦气作为剥蚀物质的载气。LA-ICP-MS 分析的详细方法和流程见袁洪林等(2003)描述。测试数据的计算处理采用 ISO-PLOT 3.0 程序(Ludwig, 2003)。所有数据点年龄值的误差均为 1σ,采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,其加权平均值具 95% 的置信度(Ander-son, 2002a; Ludwig, 2003)。锆石 Lu-Hf 同位素原位分析委托武汉上谱分析科技有限责任公司实验室完成,使用 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 Geolas 193nm 激光取样系统(LA-MC-ICP-MS),激光剥蚀的斑束直



a、b.歪咀山岩体野外露头 and 手标本；c、d.石英闪长岩和花岗闪长岩单偏光下薄片；e、f.石英闪长岩和花岗闪长岩正交光下薄片；g、h.石英闪长岩和花岗闪长岩正交光下显微特征；MME.暗色包体；Hbl.角闪石；Bit.黑云母；Pl.斜长石；Kf.钾长石；Q.石英

图3 歪咀山岩体的野外露头及显微特征

Fig. 3 Field outcrops and microscopic characteristics of the Waizuishan pluton

径为 44 μm , 能量密度为 10 J/cm², 频率为 8 Hz, 分析流程参考徐平等(2004)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

笔者选取歪咀山岩体石英闪长岩(Pm115TW9)和花岗闪长岩(TW8813)两件岩石样品进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄测试。锆石阴极发光图像(图 4)

显示: 两件样品中的锆石颗粒结晶程度良好, 主要呈现长柱状晶形, 部分为短柱状, 晶体长度为 110~260 μm , 长宽比范围为 1.1:1~2.6:1, 可见锆石内部发育清晰的生长环带结构。在分析过程中, 优先选择锆石环带边部打点, 获取锆石的 U、Th、Pb 同位素成分数据及谐和年龄(表 2), 两个样品的 Th/U 值几乎均大于 0.4, 表明为典型的岩浆成因锆石(Hoskin et al., 2003; 胡运行等, 2025; 魏博等, 2025; 向浩予等, 2025)。

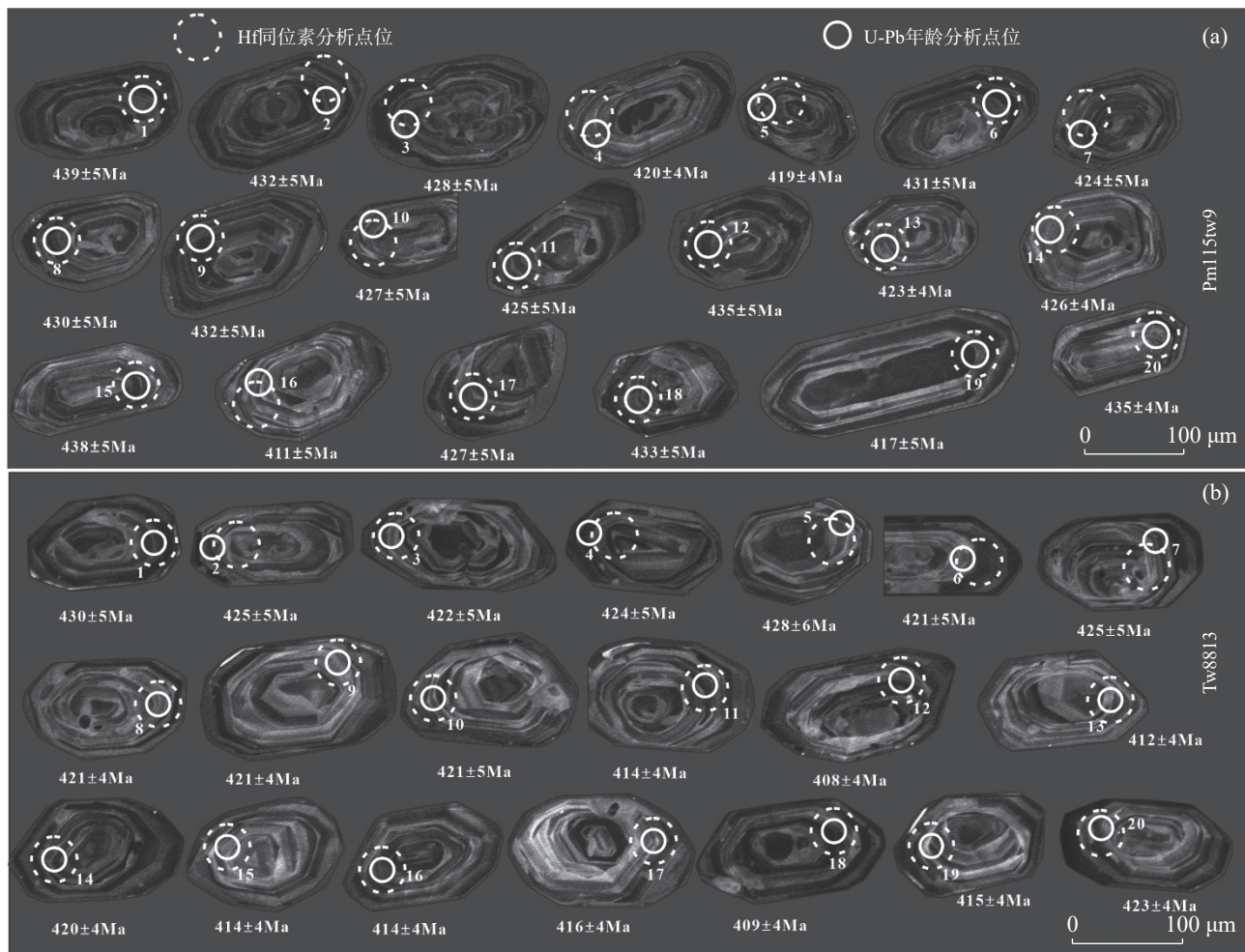


图4 歪咀山岩体石英闪长岩和花岗闪长岩的锆石阴极发光图像

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence images of quartz diorite and granodiorite from the Waizuishan pluton

石英闪长岩 Pm115TW9 中 20 个测点的 Th/U 值为 0.48~0.73, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 原位年龄为 411~439 Ma, 其加权平均年龄为 $(427.1 \pm 3.4) \text{ Ma}$ (MSWD=2.4) (图 5a)。花岗闪长岩 TW8813 中 20 个测点的 Th/U 值为 0.38~0.60, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 原位年龄介于 408~430 Ma, 其加权平均年龄为 $(418.6 \pm 2.8) \text{ Ma}$ (MSWD=1.8) (图 5b)。两个样品测定的年龄结果均在允许误差范围内, 可以

确定石英闪长岩和花岗闪长岩的结晶年龄分别为 $(427.1 \pm 3.4) \text{ Ma}$ 和 $(418.6 \pm 2.8) \text{ Ma}$ 。因此, 歪咀山岩体的侵位年龄为 419~427 Ma, 属中—晚志留世。

3.2 岩石地球化学特征

歪咀山岩体 SiO_2 含量为 58.48%~67.30%, Al_2O_3 含量为 14.96%~16.91%, MgO 含量为 2.00%~4.13%, FeO^* 含量为 3.56%~6.61%, $\text{Mg}^\#$ 值为 36~39, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$

表2 歪咀山岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Tab. 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical data of the Waizuishan pluton

测点号	含量 (10^{-6})				同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
PM115TW9 花岗闪长岩 20个测点的加权平均年龄为427.1 $\pm$ 3.4 Ma, MSWD=2.4																
1	46	363	629	0.58	0.070 4	0.000 8	0.547 7	0.008 9	0.056 4	0.000 7	439	5	443	7	468	29
2	56	472	778	0.61	0.069 3	0.000 8	0.536 5	0.009 2	0.056 1	0.000 7	432	5	436	8	458	29
3	51	408	715	0.57	0.068 7	0.000 7	0.540 4	0.008 3	0.057 1	0.000 7	428	5	439	7	494	28
4	38	311	551	0.56	0.067 3	0.000 7	0.533 6	0.008 3	0.057 5	0.000 8	420	4	434	7	511	29
5	52	529	725	0.73	0.067 1	0.000 7	0.528 5	0.008 5	0.057 1	0.000 7	419	4	431	7	496	28
6	53	392	747	0.52	0.069 1	0.000 8	0.540 9	0.009 2	0.056 8	0.000 7	431	5	439	7	483	28
7	59	568	818	0.69	0.068 0	0.000 7	0.513 0	0.008 1	0.054 7	0.000 7	424	5	420	7	401	29
8	67	654	898	0.73	0.068 9	0.000 8	0.547 1	0.009 5	0.057 6	0.000 7	430	5	443	8	513	28
9	49	340	685	0.50	0.069 3	0.000 8	0.525 7	0.008 8	0.055 1	0.000 7	432	5	429	7	414	29
10	41	361	568	0.64	0.068 5	0.000 8	0.537 4	0.009 0	0.056 9	0.000 7	427	5	437	7	488	29
11	39	306	553	0.55	0.068 2	0.000 7	0.523 5	0.008 5	0.055 7	0.000 7	425	5	427	7	438	29
12	48	361	658	0.55	0.069 8	0.000 8	0.541 3	0.009 0	0.056 2	0.000 7	435	5	439	7	462	28
13	31	215	449	0.48	0.067 8	0.000 7	0.505 9	0.008 3	0.054 2	0.000 7	423	4	416	7	377	30
14	39	305	556	0.55	0.068 3	0.000 7	0.498 4	0.008 1	0.053 0	0.000 7	426	4	411	7	327	30
15	33	321	443	0.73	0.070 3	0.000 8	0.520 1	0.008 6	0.053 7	0.000 7	438	5	425	7	357	30
16	26	186	390	0.48	0.065 8	0.000 7	0.494 1	0.008 6	0.054 5	0.000 8	411	5	408	7	390	32
17	37	295	535	0.55	0.068 5	0.000 8	0.528 1	0.009 8	0.055 9	0.000 8	427	5	431	8	450	31
18	40	300	570	0.53	0.069 5	0.000 7	0.522 2	0.008 3	0.054 5	0.000 7	433	5	427	7	391	29
19	74	730	1062	0.69	0.066 9	0.000 7	0.510 1	0.008 1	0.055 3	0.000 7	417	5	419	7	424	28
20	43	404	595	0.68	0.069 9	0.000 7	0.537 9	0.008 6	0.055 9	0.000 7	435	4	437	7	446	29
TW8813 花岗闪长岩 20个测点的加权平均年龄为418.6 $\pm$ 2.8Ma, MSWD=1.8																
1	29	194	418	0.46	0.069 0	0.000 8	0.511 7	0.009 1	0.053 8	0.000 8	430	5	420	7	362	32
2	37	259	530	0.49	0.068 1	0.000 8	0.518 8	0.008 8	0.055 2	0.000 8	425	5	424	7	422	30
3	37	266	548	0.49	0.067 7	0.000 7	0.500 2	0.008 3	0.053 6	0.000 7	422	5	412	7	355	30
4	61	431	891	0.48	0.068 1	0.000 8	0.508 5	0.008 2	0.054 2	0.000 7	424	5	417	7	379	30
5	27	168	401	0.42	0.068 7	0.000 9	0.517 4	0.010 3	0.054 7	0.000 8	428	6	423	8	398	33
6	26	168	390	0.43	0.067 5	0.000 8	0.489 5	0.009 2	0.052 6	0.000 8	421	5	405	8	311	35
7	31	198	453	0.44	0.068 1	0.000 7	0.519 5	0.009 3	0.055 3	0.000 8	425	5	425	8	424	33
8	29	169	441	0.38	0.067 6	0.000 7	0.496 7	0.009 0	0.053 3	0.000 8	421	4	409	7	342	36
9	25	150	382	0.39	0.067 5	0.000 7	0.508 0	0.009 0	0.054 5	0.000 8	421	4	417	7	393	35
10	37	237	551	0.43	0.067 5	0.000 7	0.501 5	0.008 7	0.053 9	0.000 8	421	5	413	7	366	33
11	44	326	664	0.49	0.066 4	0.000 7	0.486 4	0.008 2	0.053 1	0.000 8	414	4	402	7	334	33
12	50	383	758	0.50	0.065 3	0.000 7	0.516 6	0.008 3	0.057 4	0.000 8	408	4	423	7	506	29
13	45	403	667	0.60	0.066 0	0.000 7	0.490 1	0.007 7	0.053 9	0.000 7	412	4	405	6	365	30
14	48	372	685	0.54	0.067 4	0.000 7	0.524 5	0.008 2	0.056 4	0.000 8	420	4	428	7	470	31
15	30	202	452	0.45	0.066 3	0.000 7	0.508 2	0.008 6	0.055 6	0.000 8	414	4	417	7	437	33
16	47	372	692	0.54	0.066 4	0.000 7	0.519 8	0.009 2	0.056 8	0.000 8	414	4	425	8	483	31
17	29	198	425	0.47	0.066 7	0.000 7	0.499 8	0.008 2	0.054 4	0.000 8	416	4	412	7	386	32
18	47	393	702	0.56	0.065 5	0.000 7	0.524 6	0.008 4	0.058 1	0.000 8	409	4	428	7	532	29
19	32	256	471	0.54	0.066 4	0.000 7	0.501 9	0.008 5	0.054 8	0.000 8	415	4	413	7	403	33
20	28	223	409	0.55	0.067 8	0.000 7	0.555 9	0.009 8	0.059 4	0.000 9	423	4	449	8	583	32

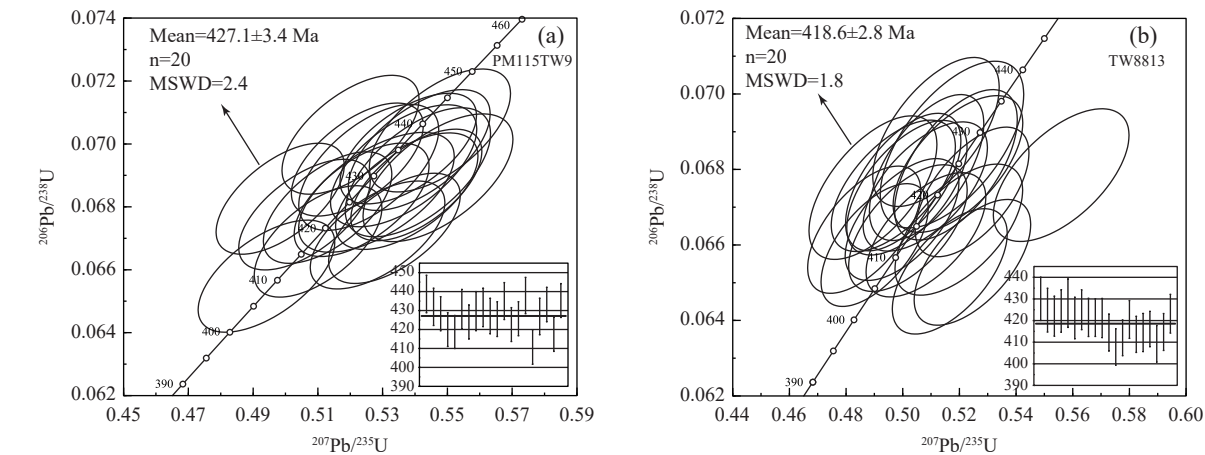


图5 歪咀山岩体石英闪长岩和花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram for quartz diorite and granodiorite from the Waizuishan pluton

含量为5.88%~6.72%, K_2O/Na_2O 值为0.57~1.04(表3)。在侵入岩的 TAS 图解中,歪咀山岩体所有样品落在亚碱性的闪长岩和花岗闪长岩区域(图 6a)。歪咀山岩体样品的铝饱和指数 A/CNK 值为 0.89~0.95,属于准铝质系列(图 6b)。此外,歪咀山岩体样品还具有钙碱性及镁质特征(图 6c、图 6d)。

歪咀山岩体稀土元素总量(ΣREE)较低,变化范围为 $106.51 \times 10^{-6} \sim 198.01 \times 10^{-6}$,平均值为 136.83×10^{-6} ,

表 3 歪咀山岩体的全岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Tab. 3 Whole-rock major (%) and trace (10^{-6}) element data of the Waizuishan pluton

样号	Pm115YQ9	Pm115YQ16	Pm115YQ21	YQ8813	YQ8814	YQ8816
SiO ₂	60.83	59.13	67.30	60.69	61.48	58.48
TiO ₂	0.68	0.76	0.52	0.69	0.62	0.98
Al ₂ O ₃	16.61	16.91	14.96	16.84	16.84	16.11
Fe ₂ O ₃	2.02	2.24	1.64	1.89	2.19	2.25
FeO	3.41	3.43	2.08	3.35	2.77	4.58
MnO	0.089	0.086	0.063	0.091	0.091	0.12
MgO	2.98	3.20	2.00	3.27	2.79	4.13
CaO	5.40	5.78	3.60	5.44	5.25	5.33
Na ₂ O	3.47	3.68	3.30	3.74	3.76	3.42
K ₂ O	2.80	2.22	3.42	2.14	2.45	2.53
P ₂ O ₅	0.19	0.20	0.13	0.19	0.18	0.26
H ₂ O ⁺	0.71	1.25	0.68	0.98	0.93	0.96
H ₂ O ⁻	0.15	0.16	0.19	0.26	0.21	0.22
灼失量	1.36	2.20	0.85	1.53	1.45	1.67
V	116.13	125.01	91.92	134.86	136.43	162.87
Cr	36.18	38.95	35.05	37.57	23.29	46.82
Co	17.02	19.42	11.55	17.33	15.39	23.50
Ni	24.53	27.11	19.41	24.66	18.14	32.34
Sc	13.70	14.75	8.72	10.16	10.92	12.71
Cs	6.25	3.15	3.50	4.56	4.24	3.94
Rb	93.87	82.61	102.68	96.05	109.97	106.86
Sr	498.40	557.85	391.48	522.70	522.63	531.49
Ba	565.97	476.51	476.80	507.86	485.75	515.39
Ga	20.50	21.87	17.68	20.38	21.34	22.92
Nb	9.31	7.28	9.94	8.29	9.91	14.87
Ta	0.94	0.41	0.94	0.54	0.90	1.24
Zr	185.44	130.99	112.05	155.64	143.06	195.22
Hf	5.95	4.26	3.52	4.12	4.00	5.96

续表 3

样号	Pm115YQ9	Pm115YQ16	Pm115YQ21	YQ8813	YQ8814	YQ8816
Th	33.98	6.60	31.79	5.19	13.98	7.50
U	3.65	2.32	4.39	3.13	3.77	2.92
Pb	18.80	14.70	16.90	16.00	18.50	10.90
La	49.82	27.34	32.15	18.43	32.35	24.22
Ce	88.73	43.23	47.98	45.71	64.86	61.38
Pr	9.61	5.55	5.52	5.29	6.23	7.10
Nd	30.75	20.71	19.05	21.12	22.51	28.53
Sm	4.95	3.92	3.28	4.07	4.02	5.56
Eu	1.16	1.05	0.90	1.01	1.09	1.42
Gd	4.91	3.53	3.14	3.48	3.88	4.64
Tb	0.65	0.54	0.45	0.52	0.54	0.72
Dy	3.14	2.75	2.23	2.89	2.99	4.06
Ho	0.58	0.51	0.41	0.52	0.54	0.73
Er	1.62	1.36	1.18	1.51	1.61	2.21
Tm	0.26	0.22	0.20	0.24	0.26	0.34
Yb	1.60	1.38	1.35	1.49	1.57	2.20
Lu	0.22	0.18	0.19	0.22	0.25	0.35
Y	18.03	14.72	12.90	14.95	15.76	22.14
Na ₂ O+K ₂ O	6.36	6.04	6.78	5.98	6.31	6.06
K ₂ O/Na ₂ O	0.81	0.60	1.04	0.57	0.65	0.74
A/CNK	0.90	0.89	0.95	0.92	0.92	0.89
A/NK	1.90	2.00	1.64	1.99	1.90	1.93
FeO*	5.23	5.44	3.56	5.05	4.73	6.61
Mg [#]	36.35	37.07	36.02	39.29	37.04	38.43
LREE/HREE	14.26	9.73	11.91	8.79	11.26	8.40
δEu	0.72	0.86	0.86	0.82	0.84	0.86
(La/Yb) _N	22.31	14.23	17.08	8.87	14.74	7.91
10 000 Ga/Al	2.33	2.44	2.23	2.29	2.39	2.69
R1	2 131	2 089	2 485	2 185	2 157	2 044
R2	1 068	1 136	785	1 093	1 047	1 111
Nb/La	0.19	0.27	0.31	0.45	0.31	0.61
Ta/Yb	0.59	0.30	0.69	0.36	0.57	0.56

注: FeO* = FeO + 0.899 8 Fe₂O₃; Mg[#] = 100×MgO/(MgO + FeO*); R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti); R2 = 6Ca + 2Mg + Al。

稀土元素分配曲线均呈右倾样式(图 7a), 富集轻稀土元素, LREE/HREE 值为 8.40~14.26, (La/Yb)_N 值为 7.91~22.31, 具有较弱的负 Eu 异常, δEu 值为 0.72~0.86。在微量元素原始地幔标准化图解(图 7b)中, Rb、Th、U、K、Pb 等大离子亲石元素(LILEs)相对富集, 而 Nb、Ta、P、Zr、Ti 等高场强元素(HFSEs)明显亏损。

3.3 锆石 Hf 同位素特征

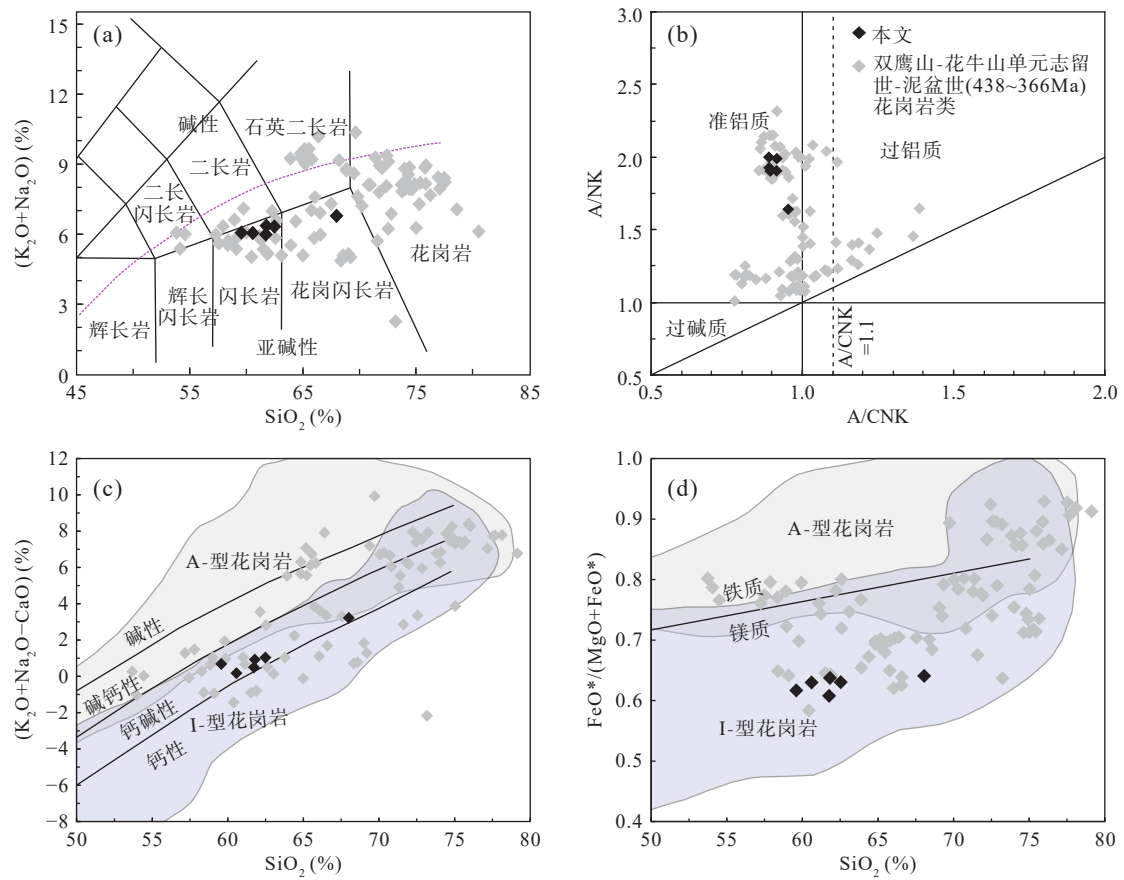
2 件样品锆石的 ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值分别为 0.013 487~0.047 310 和 0.000 403~0.001 343(表 4), ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值均小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 仅具有较少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值代表锆石形成时的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值(吴福元等, 2007)。2 件样品的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 在 -0.99~-0.96, 明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.34; Amelin et al., 2000)和硅铝

质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.72; Vervoort et al., 1996), 故二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间或其源区物质在地壳的平均存留年龄。样品 PM115TW9 共 20 颗锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化 -2.0~0.4 之间, 对应的地壳模式年龄 t_{DM2} 为 1.54~1.42 Ga; 样品 TW8813 共 20 颗锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -2.0~0.6, 对应的地壳模式年龄 t_{DM2} 为 1.53~1.36 Ga(表 4)。

4 讨论

4.1 早古生代岩浆事件

歪咀山岩体位于北山造山带南部的双鹰山-花牛山构造单元东南缘, 前人在 1:20 万五道明幅区域地质调查报告中将其判定为印支期岩浆作用的产物, 目



a. $(K_2O+Na_2O)-SiO_2$ 图解 (Middlemost, 1994); b. $A/CNK-A/NK$ 图解 (Maniar and Piccoli, 1989); c. $(K_2O+Na_2O-CaO)-SiO_2$ 和 d. $FeO^*/(MgO+FeO^*)-SiO_2$ 图解 (Frost et al., 2001); 双鹰山-花牛山构造单元志留世—泥盆世(438~366 Ma)花岗岩类数据来源见表 1

图6 歪咀山岩体的地球化学分类图解

Fig. 6 Geochemical classification diagrams of the Waizuishan pluton

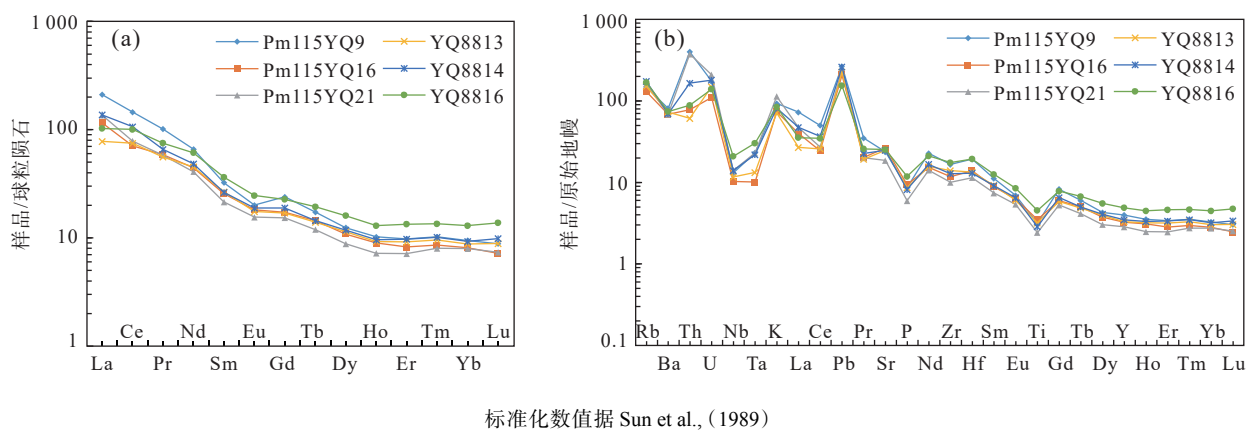


图7 歪咀山岩体的微量元素原始地幔标准化蛛网图及稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element patterns and chondrite-normalized REE patterns of the Waizuishan pluton

前尚未有同位素测年结果的报道。文中采用 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法, 分别获得有 (427.1 ± 3.4) Ma 和 (418.6 ± 2.8) Ma 的加权平均年龄, 表明该岩体的岩浆结晶时间为中—晚志留世。本次调查的红沟山南古

硐井群上组红柱黑云片岩中记录了一组平均年龄为 432 Ma 的岩浆事件, 在磨石沟敦煌岩群片麻岩中获得同期的一组年龄 430 Ma, 表明研究区在早古生代存在一期~430 Ma 的构造热事件(自然资源实物地质资料

中心, 2019)。

同时期的岩浆事件在北山造山带南北带均发育(图 1b), 包括南带双鹰山-花牛山构造单元柳园花岗岩闪长岩和正长花岗岩(423 Ma 和 436 Ma; 赵泽辉等,

2007)、片麻状黑云母花岗岩(424 Ma; 毛启贵等; 2010)、明舒井闪长岩和花岗岩(437~436 Ma; 李小菲等, 2015)、明舒井花岗岩闪长岩和花岗岩(437~423 Ma; 王红杰等, 2024)、鼎新红脊山二长花岗岩(437 Ma; 张

表 4 歪咀山岩体锆石 Hf 同位素组成

Tab. 4 Hf isotopic data for zircons of the Waizuishan pluton

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM} (Ma)	T_{DMC} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
PM115TW9: 20个测点加权平均年龄 (427.1 ± 3.4) Ma, MSWD = 2.4													
01	439	0.035 765	0.000 518	0.001 013	0.000 009	0.282 508	0.000 013	0.282 500	-9.3	0.0	1 053	1 420	-0.97
02	432	0.015 118	0.000 227	0.000 463	0.000 003	0.282 501	0.000 012	0.282 497	-9.6	-0.2	1 047	1 429	-0.99
03	428	0.028 509	0.000 368	0.000 884	0.000 008	0.282 505	0.000 014	0.282 498	-9.4	-0.3	1 053	1 430	-0.97
04	420	0.020 915	0.000 094	0.000 630	0.000 003	0.282 512	0.000 012	0.282 507	-9.2	-0.1	1 037	1 415	-0.98
05	419	0.040 645	0.001 288	0.001 179	0.000 030	0.282 491	0.000 015	0.282 482	-9.9	-1.1	1 081	1 473	-0.96
06	431	0.023 287	0.000 187	0.000 672	0.000 004	0.282 481	0.000 013	0.282 476	-10.3	-1.0	1 080	1 478	-0.98
07	424	0.034 053	0.000 263	0.000 994	0.000 006	0.282 505	0.000 012	0.282 497	-9.4	-0.4	1 056	1 435	-0.97
08	430	0.021 156	0.000 692	0.000 601	0.000 016	0.282 495	0.000 013	0.282 490	-9.8	-0.5	1 059	1 446	-0.98
09	432	0.025 823	0.000 150	0.000 785	0.000 003	0.282 490	0.000 013	0.282 484	-10.0	-0.7	1 071	1 460	-0.98
10	427	0.021 963	0.000 189	0.000 647	0.000 005	0.282 501	0.000 012	0.282 496	-9.6	-0.4	1 053	1 436	-0.98
11	425	0.017 687	0.000 157	0.000 617	0.000 006	0.282 457	0.000 013	0.282 452	-11.1	-2.0	1 113	1 535	-0.98
12	435	0.030 201	0.000 385	0.000 919	0.000 019	0.282 504	0.000 013	0.282 496	-9.5	-0.2	1 056	1 429	-0.97
13	423	0.019 962	0.000 117	0.000 595	0.000 006	0.282 499	0.000 012	0.282 494	-9.7	-0.5	1 054	1 443	-0.98
14	426	0.020 011	0.000 492	0.000 582	0.000 009	0.282 471	0.000 013	0.282 467	-10.6	-1.4	1 092	1 502	-0.98
15	438	0.039 400	0.000 233	0.001 043	0.000 012	0.282 519	0.000 013	0.282 511	-8.9	0.4	1 037	1 395	-0.97
16	411	0.039 359	0.000 846	0.001 174	0.000 028	0.282 489	0.000 014	0.282 480	-10.0	-1.3	1 084	1 482	-0.96
17	427	0.019 749	0.000 141	0.000 579	0.000 003	0.282 505	0.000 012	0.282 501	-9.4	-0.2	1 044	1 425	-0.98
18	433	0.026 524	0.000 368	0.000 761	0.000 005	0.282 485	0.000 012	0.282 478	-10.2	-0.9	1 078	1 471	-0.98
19	417	0.037 198	0.000 452	0.001 055	0.000 007	0.282 514	0.000 014	0.282 506	-9.1	-0.2	1 045	1 419	-0.97
20	435	0.028 414	0.000 140	0.000 843	0.000 011	0.282 510	0.000 014	0.282 503	-9.3	0.1	1 045	1 413	-0.97
TW8813: 20个测点加权平均年龄 418.6 ± 2.8 Ma, MSWD = 1.8													
01	430	0.023 624	0.000 209	0.000 721	0.000 005	0.282 520	0.000 015	0.282 514	-8.9	0.3	1 028	1 394	-0.98
02	425	0.019 415	0.000 072	0.000 592	0.000 005	0.282 496	0.000 013	0.282 491	-9.8	-0.6	1 058	1 448	-0.98
03	422	0.014 699	0.000 190	0.000 439	0.000 003	0.282 497	0.000 013	0.282 494	-9.7	-0.6	1 052	1 444	-0.99
04	424	0.027 697	0.000 648	0.000 817	0.000 011	0.282 488	0.000 012	0.282 482	-10.0	-0.9	1 075	1 469	-0.98
05	428	0.030 441	0.000 339	0.000 854	0.000 003	0.282 497	0.000 012	0.282 490	-9.7	-0.6	1 064	1 449	-0.97
06	421	0.016 097	0.000 118	0.000 578	0.000 010	0.282 490	0.000 012	0.282 486	-10.0	-0.9	1 065	1 462	-0.98
07	425	0.021 139	0.000 326	0.000 603	0.000 007	0.282 490	0.000 012	0.282 485	-10.0	-0.8	1 067	1 461	-0.98
08	421	0.022 162	0.000 131	0.000 692	0.000 004	0.282 515	0.000 012	0.282 509	-9.1	0.0	1 034	1 409	-0.98
09	421	0.017 558	0.000 095	0.000 514	0.000 006	0.282 502	0.000 012	0.282 498	-9.6	-0.4	1 047	1 435	-0.98
10	421	0.019 321	0.000 045	0.000 575	0.000 002	0.282 504	0.000 011	0.282 500	-9.5	-0.4	1 046	1 431	-0.98
11	414	0.019 847	0.000 187	0.000 567	0.000 002	0.282 507	0.000 012	0.282 502	-9.4	-0.4	1 042	1 430	-0.98
12	408	0.020 279	0.000 448	0.000 598	0.000 009	0.282 488	0.000 013	0.282 484	-10.0	-1.2	1 069	1 476	-0.98
13	412	0.047 310	0.000 641	0.001 343	0.000 015	0.282 505	0.000 014	0.282 495	-9.4	-0.7	1 066	1 448	-0.96
14	420	0.030 907	0.000 361	0.000 876	0.000 008	0.282 489	0.000 013	0.282 482	-10.0	-1.0	1 075	1 471	-0.97
15	414	0.013 487	0.000 319	0.000 403	0.000 007	0.282 535	0.000 013	0.282 532	-8.4	0.6	998	1 362	-0.99
16	414	0.020 755	0.000 771	0.000 640	0.000 016	0.282 463	0.000 012	0.282 458	-10.9	-2.0	1 105	1 528	-0.98
17	416	0.015 991	0.000 122	0.000 476	0.000 005	0.282 490	0.000 011	0.282 487	-10.0	-0.9	1 062	1 463	-0.99
18	409	0.015 802	0.000 250	0.000 486	0.000 006	0.282 515	0.000 012	0.282 511	-9.1	-0.2	1 029	1 413	-0.99
19	415	0.018 577	0.000 176	0.000 601	0.000 009	0.282 493	0.000 012	0.282 489	-9.8	-0.9	1 061	1 459	-0.98
20	423	0.014 677	0.000 215	0.000 460	0.000 005	0.282 524	0.000 012	0.282 520	-8.8	0.4	1 016	1 384	-0.99

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 10\,000 \times \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\}$. $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$. $t_{\text{DMC}} = t_{\text{DM}} - (t_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$. $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1$. 其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Soderlund et al., 2004); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}}$ 为样品测量值; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997; Griffin et al., 2000); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{cc}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; $f_{\text{s}} = f_{\text{Lu/Hf}}$; $f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; t 为锆石结晶年龄。

新虎等, 2008), 这些花岗岩多具钙碱性准铝质镁质特征(图 6, 表 1); 石板山构造单元桥湾糜棱岩化花岗岩和金塔正长花岗岩(435~433 Ma; 贺振宇等, 2014); 北带马鬃山构造单元白圪塔北山花岗岩类(436~431 Ma; 李小菲, 2013)、白头山花岗岩类(435~421 Ma; Zheng et al., 2018)、红柳峡糜棱岩化花岗岩(446~430 Ma; Yuan et al., 2018); 黑鹰山-旱山构造单元石板井花岗岩类(464~428 Ma; Yuan et al., 2018)、白石山头片麻状花岗岩(423 Ma; 刘雪敏等, 2010)、小黄山片麻状花岗岩(443~442 Ma; 胡新苗等, 2024)。这些岩浆作用记录反映了北山造山带经历了重要的早古生代构造热事件, 侵入岩岩石组合主要为高钾钙碱性 I 型花岗岩, 部分岩体具有埃达克质岩石的性质(Mao et al., 2012, 王红杰等, 2024), 并发育少量 A 型花岗岩(李舫等, 2009)。

4.2 岩石成因与源区判别

歪咀山岩体所有样品中未发现霓辉石、钠铁闪石等碱性暗色矿物, 10 000 Ga/Al 值为 2.23~2.69, Zr 值为 112×10^{-6} ~ 195×10^{-6} , Nb 值为 7×10^{-6} ~ 15×10^{-6} , Ce 值为 43×10^{-6} ~ 89×10^{-6} , Y 值为 13×10^{-6} ~ 22×10^{-6} , 有别于典型的 A 型花岗岩地球化学特征(10 000 Ga/Al > 2.6, Zr > 250×10^{-6} , Nb > 20×10^{-6} , Ce > 100×10^{-6} , Y > 80×10^{-6} ; Whalen et al., 1987); 所有样品 A/CNK < 1, 属于准铝质, 且缺乏原生富铝矿物(如石榴子石、白云母等), 与典型的 S 型花岗岩不符。岩石样品主要矿物组合为斜长石+角闪石+黑云母+钾长石+石英, 副矿物为榍石+磷灰石+锆石+磁铁矿, 具有 I 型花岗岩类的岩石学特征; 另外岩体样品中 P_2O_5 含量几乎均低于 0.2%, 且与 SiO_2 呈负消长的关系, 显示典型的 I 型花岗岩特征(Chappell, 1999), 在主量元素岩石分类图解中也均落入 I 型花岗岩区域(图 6)。

近年来锆石原位 Hf 同位素示踪研究被应用于岩石成因的探讨, 不同地球化学储库(如亏损地幔、球粒陨石和地壳等)其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 组成以及 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显不同, 如具有低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 以及 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩石往往指示其源区为地壳或经过地壳的混染, 而具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 以及 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩石直接来自地幔或由幔源物质分异的新生壳源物质(Peter and Roland, 2003; 吴福元等, 2007)。歪咀山岩体的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均较低, 分别为 0.282 457~0.282 524 和 -2.0~0.6, 对应的地壳 Hf 模式年龄 T_{DMC} 为 1.5~1.4 Ga(表 4), 在锆石 Hf 同位素演化图解(图 8)中, 所有样品点均落

在球粒陨石演化线附近及以下的地壳区域, 表明歪咀山岩体岩浆主要来源于中元古代地壳组分的改造再循环, 样品中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值出现少数正值, 且岩体中发育闪长质包体, 可能暗示其源区存在少量幔源岩浆的贡献。

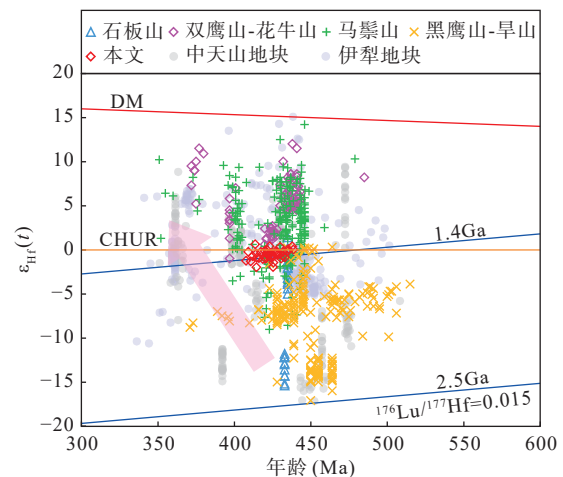


图 8 北山造山带各构造单元古生代(500~350 Ma)花岗岩类的锆石 Hf 同位素演化图解(数据来源见表 1)

Fig. 8 Zircon Hf isotopic evolution diagram for the Paleozoic granitoids from individual terranes of the Beishan Orogenic Belt

歪咀山岩体所有样品的 A/CNK 值为 0.89~0.91, 与火山弧花岗岩(A/CNK < 1.15; Maniar et al., 1989)的特征相符, Nb/La 值为 0.19~0.61, 平均值为 0.36, 接近岛弧岩浆岩的比值 0.3, 在 Rb-(Y+Nb)构造判别图解中投点均落在火山弧花岗岩区域(图 9a); Ta/Yb 值为 0.30~0.69, 平均值为 0.51, 指示岩浆源区存在与俯冲带(Ta/Yb = 0.5; Condie, 1989)有关的组分; 样品在 R1-R2 图解中投点落在板块碰撞前(破坏性活动板块边缘)花岗岩区域(图 9b)。歪咀山岩体属钙碱性, 呈现轻重稀土中度分馏的右倾 REE 配分模式, 具弱的负铈异常, 富集 LILE, 亏损 HFSE, 出现 Pb 正异常和 Nb、Ta、P、Zr、Ti 负异常(图 7), 具活动陆缘洋壳俯冲消减带岛弧岩浆作用的地球化学特征(Marjorie, 1989)。此外, 双鹰山-花牛山构造单元还出现 451 Ma 的富 Nb 玄武岩、442 Ma 的英安岩(Mao et al., 2012)和 423~425 Ma 的埃达克质花岗岩(Mao et al., 2012; 王红杰等, 2024), 以及 424~438 Ma 的高钾钙碱性花岗岩类和闪长岩(赵泽辉等, 2007; 朱江, 2013; 李小菲等, 2015), 这种由富 Nb 玄武岩、英安岩、闪长岩和高钾钙碱性花岗岩类(包括埃达克质花岗岩)等构成的岩石组合与岛弧及大陆边缘弧火成岩组合(邓晋福等, 2007)相一致。

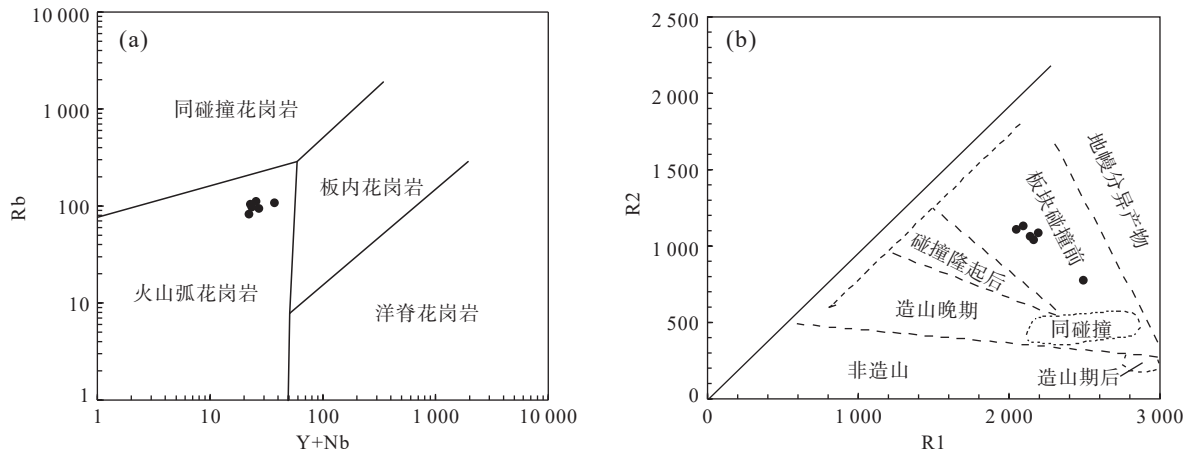


图9 歪咀山岩体 Rb-(Y+Nb) (a; 据 Pearce et al., 1984) 和 R1-R2 (b; 据 Batchelor et al., 1985) 构造环境判别图解

Fig. 9 (a) Rb-(Y+Nb) and (b) R1-R2 tectonic discriminant diagrams of the Waizuishan pluton

综上所述, 歪咀山岩体应为形成于俯冲构造背景下的大陆边缘火成岩弧。

4.3 地质意义

已有年代学研究表明, 北山造山带内最古老的蛇绿岩组合发育于红柳河-牛圈子-洗肠井构造带 (536~516 Ma; 张元元等, 2008; Ao et al., 2012; 侯青叶等, 2012), 其地球化学特征指示俯冲带(SSZ型)成因属性(周国庆等, 2000; Ao et al., 2012; 郑荣国等, 2012), 标志着早古生代初期洋壳俯冲作用的启动。古洋盆的俯冲作用贯穿早古生代, 形成具有 450~420 Ma 年龄峰值的岩浆序列(图 8), 其中, 双鹰山-花牛山构造单元发育的富 Nb 玄武岩、英安岩、闪长岩、高钾钙碱性花岗岩类岩石组合(451~423 Ma)即为该期俯冲活动的直接产物。志留纪末—早泥盆世期间, 北山造山带发育后碰撞花岗岩类(415~394 Ma)(图 8), 典型代表包括双峰山 A 型花岗岩(415 Ma)、辉铜山钾长花岗岩(397 Ma)、小泉东花岗闪长斑岩(396 Ma)及黄草滩花岗闪长岩(394 Ma), 这些岩体形成于造山后伸展环境或同碰撞晚期阶段(赵泽辉等, 2007; 李舳等, 2009; 王疆涛, 2016; 王怀涛, 2019)。另外, 平头山地区前长城系—奥陶系逆冲推覆构造(刘明强等, 2002)和上泥盆统墩墩山群磨拉石建造的造山期后沉积特征(何世平等, 2004), 指示志留纪末—早泥盆世北山造山带存在强烈的 SN 向挤压事件。综合岩浆活动与构造-沉积记录, 可确定洋盆闭合及碰撞造山事件完成于早古生代末期, 随后进入后碰撞伸展阶段。

北山造山带 4 个构造单元的早古生代花岗岩类均具有 1.5~1.4 Ga 峰值的地壳模式年龄(图 10), 北山造山带目前发现具有可靠年龄数据最老的岩石为

出露在双鹰山-花牛山构造单元上与古堡泉超高压变质岩空间上共生的 1.5~1.4 Ga 花岗质片麻岩(He et al., 2018; Li et al., 2023)和出露在石板山构造单元约 1.4 Ga 的旧井花岗质片麻岩(贺振宇等, 2015; Yuan et al., 2019; 王浩, 2022), 说明中元古代可能是北山地区重要的地壳生长时期。双鹰山-花牛山单元和马鬃山单元均出现 0.8~1.0 Ga 的年龄峰值(图 10), 加上黑鹰山-早山构造单元哈珠片麻状花岗岩(892 Ma 和 885 Ma; 牛文超等, 2017, 2019), 双鹰山-花牛山构造单元东黑尖山花岗质片麻岩、石峡糜棱岩化花岗岩、二长岩和大湾城玄武岩(901~884 Ma; Wang et al., 2021a, 2021b)、尖山子似斑状花岗岩(892 Ma; 李沅柏等, 2021; 935~901 Ma; 王必任等, 2024), 石板山构造单元雅丹片麻状花岗岩(933 Ma; Yuan et al., 2015)、白墩子片麻状花岗岩和石板敦斜长角闪岩(880 Ma; 姜洪颖等, 2013)的年代学数据报道, 说明北山地区在新元古代发生地壳再造。石板山单元和黑鹰山-早山单元均出现~2.2 Ga 的地壳模式年龄峰值(图 10), 说明北山造山带可能存在古元古代古老地壳, 但尚缺少可靠年龄的最直接的古元古代岩石记录。

北山造山带存在的中元古代(1.5~1.4 Ga)和新元古代(0.8~1.0 Ga)两期构造热事件记录, 表明所有的构造单元经历了相似的前寒武演化历史, 可能来源于统一的陆块。笔者对比了北山造山带、中天山地块和伊犁地块古生代(500~350 Ma)岩浆岩的锆石 Hf 地壳模式年龄, 发现三者均具有~1.4 Ga 和~0.9 Ga 的年龄峰值, 北山造山带和中天山地块还共同出现~2.2 Ga 的年龄峰值, 可以推测三者可能具有统一的来源。袁禹(2019)对比研究了北山造山带南部与中天山地块

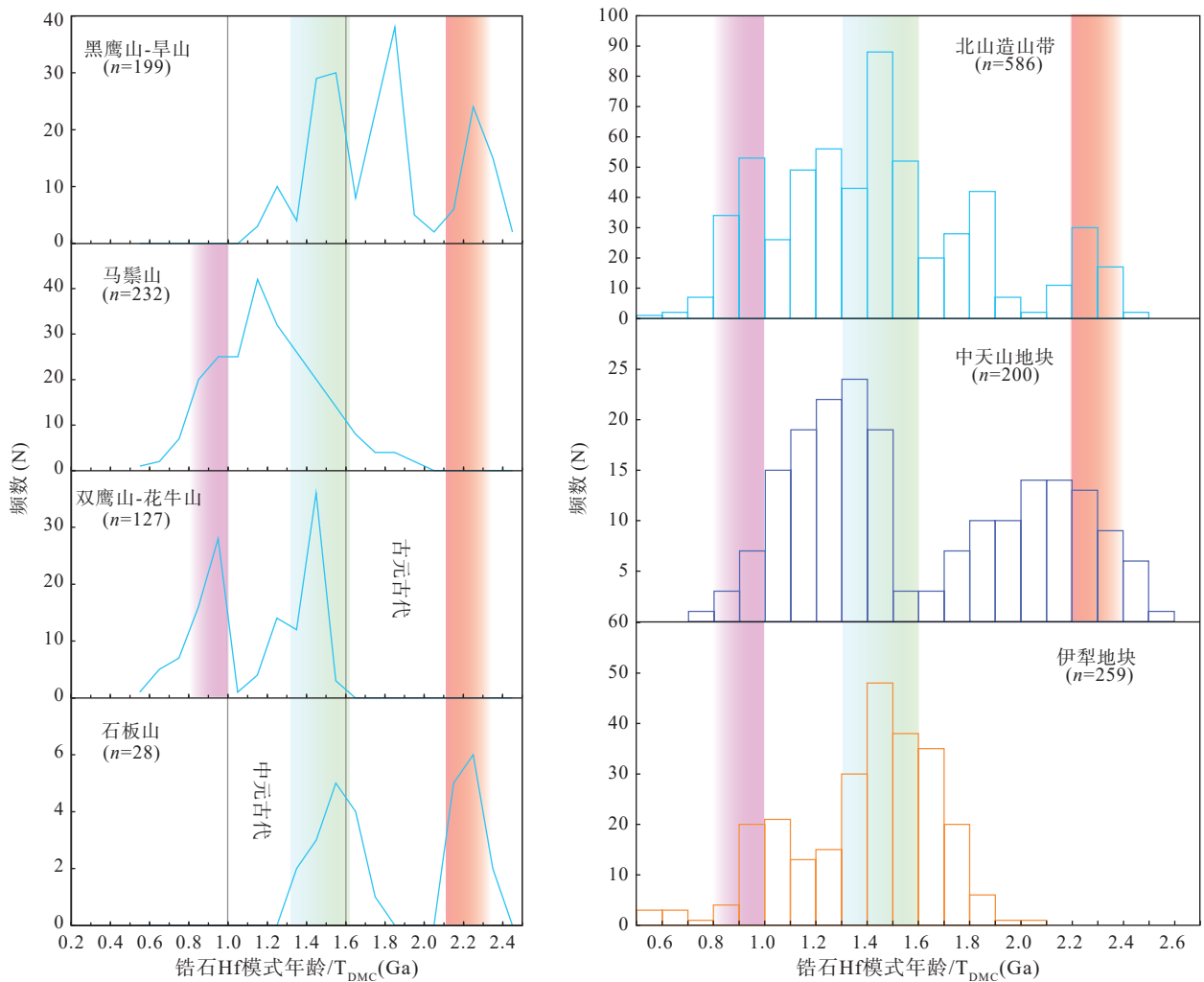


图10 北山造山带以及相邻构造单元古生代(500~350 Ma)岩浆锆石 Hf 模式年龄统计

Fig. 10 Zircon Hf model age frequency diagrams of zircon grains from the Paleozoic magmatic rocks in the Beishan Orogenic Belt and adjacent tectonic units

的前寒武纪构造演化,认为二者在岩石组合、形成时代、锆石 Hf 同位素组成及二阶段 Hf 模式年龄方面十分接近。He et al.(2014)对比了中天山地块与波罗的克拉通的前寒武纪演化史,发现两者具有同步性。敦煌地块及塔里木克拉通普遍出露中-高级变质的古元古代变质岩和新太古代 TTG(He et al., 2012, 2013; Zong et al., 2013),这些被视为结晶基底的岩石组合在北山造山带内几乎不存在(袁禹, 2019)。相反,北山造山带存在的中-新元古代两期构造热事件组合,在敦煌地块和塔里木克拉通也很少发现,而波罗的克拉通内的 Valhalla 造山带和劳伦克拉通西北缘发育类似的岩浆岩组合(Andersen et al., 2002b, 2004; Brander et al., 2009; Cawood et al., 2010; Lubnina et al., 2010; Petersson et al., 2015)。基于以上对比研究,笔者推测北

山造山带、中天山地块和伊犁地块更有可能起源于波罗的克拉通和劳伦克拉通,而与以敦煌地块为代表的塔里木克拉通不具有亲缘性。

5 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,歪咀山岩体石英闪长岩和花岗闪长岩形成于(427.1±3.4) Ma 和(418.6±2.8) Ma,表明歪咀山地区在中-晚志留世发生了重要的构造岩浆事件。

(2) 歪咀山岩体属准铝质系列、钙碱性镁质岩石,具有 I 型花岗岩特征,地球化学特征指示其岩浆可能来源于中元古代地壳组分的改造再循环,并存在少量幔源物质的贡献,其为形成于俯冲构造背景下的大陆

边缘火成岩弧。

(3) 北山造山带存在几乎同期的早古生代岩浆活动(450~420 Ma), 且存在中元古代(1.5~1.4 Ga)和新元古代(0.8~1.0 Ga)两期构造热事件记录, 表明北山造山带各构造单元经历了相似的前寒武演化历史, 可能具有统一的来源。北山造山带与伊犁地块、中天山地块存在可比性, 推测三者与波罗的克拉通和劳伦克拉通更具亲缘性, 而与以敦煌地块为代表的塔里木克拉通不具亲缘性。

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):

- 白荣龙, 虎金荣, 赵甫峰, 等. 北山造山带红柳河槽-跃进山地区石炭纪花岗岩成因及构造岩浆演化研究[J]. 岩石学报, 2022, 38(3): 713-742.
- BAI Ronglong, HU Jinrong, ZHAO Fufeng, et al. Genesis and tectonic magmatic evolution of Carboniferous granites in the Hongliuhecao-Yuejinshan area of Beishan orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(3): 713-742.
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 392-402.
- DENG Jinfu, XIAO Qinghui, SU Shangguo, et al. Igneous petro-tectonic assemblages and tectonic settings: A discussion[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 392-402.
- 冯继承, 张文, 吴泰然, 等. 甘肃北山桥湾北花岗岩体的年代学、地球化学及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 61-70.
- FENG Jicheng, ZHANG Wen, WU Tairan, et al. Geochronology and geochemistry of granite pluton in the north of Qiaowan, Beishan mountain, Gansu Province, China, and its geological significance[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(1): 61-70.
- 何世平, 周会武, 姚文光, 等. 甘肃北山中泥盆统砾岩中放射虫的发现及其地质意义[J]. 西北地质, 2004, 37(3): 24-28.
- HE Shiping, ZHOU Huiwu, YAO Wenguang, et al. Discovery and significance of Radiolaria from Middle Devonian conglomerate in Beishan area, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(3): 24-28.
- 贺振宇, 宗克清, 姜洪颖, 等. 北山造山带南部早古生代构造演化: 来自花岗岩的约束[J]. 岩石学报, 2014, 30(8): 2324-2338.
- HE Zhenyu, ZONG Keqing, JIANG Hongying, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the southern Beishan orogenic collage: Insights from the granitoids[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2324-2338.
- 贺振宇, 孙立新, 毛玲娟, 等. 北山造山带南部片麻岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素: 中元古代的岩浆作用与地壳生长[J]. 科学通报, 2015, 60: 389-399.
- HE Zhenyu, SUN Lixin, MAO Lingjuan, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneiss and granodiorite from the southern Beishan orogenic collage: Mesoproterozoic magmatism and crustal growth[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60: 389-399.
- 侯青叶, 王忠, 刘金宝, 等. 北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及 SHRIMP 定年[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 1008-1018.
- HOU Qingye, WANG Zhong, LIU Jinbao, et al. Geochemistry characteristics and SHRIMP dating of Yueyashan ophiolite in Beishan Orogen[J]. *Geoscience*, 2012, 26(5): 1008-1018.
- 胡新苗, 杨济远, 邓雯, 等. 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩形成时代、成因及构造环境[J]. 地质通报, 2024, 43(6): 1059-1071.
- HU Xinxiao, YANG Jiyuan, DENG Wen, et al. The formation age, origin and tectonic environment of gneissic granite in Xiaohuangshan, Beishan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(6): 1059-1071.
- 胡运行, 顾枫华, 章永梅, 等. 新疆别珍套山西段中酸性侵入岩岩石成因: 来自岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素的制约[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 99-122.
- HU Yunhang, GU Fenghua, ZHANG Yongmei, et al. Petrogenesis of Intermediate-acidic Intrusive Rocks in the Western Part of Biezhentao, Xinjiang: Constraints from Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(5): 99-122.
- 黄河, 王涛, 秦切, 等. 中天山巴仑台地区花岗质岩石的 Hf 同位素研究: 对构造演化及大陆生长的约束[J]. 地质学报, 2015, 89(12): 2286-2313.
- HUANG He, WANG Tao, QIN Qie, et al. Zircon Hf isotope characteristics of granitoids from the Baluntai region, Central Tianshan: implications for tectonic evolution and continental growth[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2286-2313.
- 黄河, 王涛, 童英, 等. 中国西天山古生代岩浆岩时空架构、源区特征及构造背景[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 25-43.
- HUANG He, WANG Tao, TONG Ying, et al. Spatial and Temporal Framework, Evolution of Magma Sources, and Tectonic Settings of Paleozoic Magmatic Rocks in West Tianshan, China[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(6): 25-43.
- 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 and NIE Fengjun. Nd-isotope constraints on origin of

- granitoids in Beishan Mountain area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 826–842.
- 姜洪颖, 贺振宇, 宗克清, 等. 北山造山带南缘北山杂岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 3949–3967.
- JIANG Hongying, HE Zhenyu, ZONG Keqing, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic studies on the Beishan complex in the southern Beishan Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(11): 3949–3967.
- 李舫, 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.
- 李舫, 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 orogen, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 27(10): 3055–3070.
- 李小菲. 北山马鬃山地区古生代花岗岩形成年龄、地球化学特征及其地质意义[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- LI Xiaofei. Formation age, geochemical characteristics and geological significance of Paleozoic granite in the Mazongshan area of Beishan [D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- 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.
- 李沅柏, 李海泉, 周文孝, 等. 北山造山带新元古代热事件及其构造意义: 来自甘肃北山南带两期花岗质岩的地球化学和年代学证据[J]. *地质通报*, 2021, 40(7): 1117–1139.
- LI Yuanbai, LI Haiquan, ZHOU Wenxiao, et al. Neoproterozoic thermal events and tectonic implications in the Beishan orogenic belt: Geochemical and geochronological evidence from two sets of granitic rocks from southern Beishan orogenic belt, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(7): 1117–1139.
- 刘明强, 党引业, 龚全胜. 甘肃北山平头山逆冲推覆构造的特征[J]. *西北地质*, 2002, 35(1): 22–27.
- LIU Mingqiang, DANG Yinye, GONG Quansheng. The feature of Pingtoushan thrust-nappe structure in Beishan, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 2002, 35(1): 22–27.
- 刘雪敏, 陈岳龙, 李大鹏, 等. 内蒙古北山造山带变辉绿岩和片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(4): 518–529.
- LIU Xuemin, CHEN Yuelong, LI Dapeng, et al. The U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in the metadiabase and gneissic granite, Beishan orogenic belt, Inner Mongolia, China and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(4): 518–529.
- 卢进才, 牛亚卓, 魏仙样, 等. 北山红石山地区晚古生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2685–2694.
- LU Jincai, NIU Yazhuo, WEI Xianyang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Late Paleozoic volcanic rocks from the Hongshishan area of the Beishan orogenic belt and its tectonic significances[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 29(8): 2685–2694.
- 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.
- LV 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.
- 苗来成, 朱明帅, 张福勤, 等. 北山地区中生代岩浆活动与成矿构造背景分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(4): 1190–1204.
- MIAO Laicheng, ZHU Mingshuai, ZHANG Fuqin. Tectonic setting of Mesozoic magmatism and associated metallogenesis in Beishan area[J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1190–1204.
- 牛文超, 任邦方, 任云伟, 等. 内蒙古北山地区发现新元古代片麻状花岗岩: 锆石 U-Pb 定年证据[J]. *中国地质*, 2017, 44(2): 409–410.
- NIU Wenchao, REN Bangfang, REN Yunwei, et al. Discovery of Neoproterozoic gneissic granite from the Beishan area, Inner Mongolia: Zircon U-Pb chronologic evidence[J]. *Geology in China*, 2017, 44(2): 409–410.
- 牛文超, 任邦方, 任云伟, 等. 北山北带新元古代岩浆记录: 来自内蒙古哈珠地区片麻状花岗岩的证据[J]. *地球科学*, 2019, 44(1): 284–297.
- NIU Wenchao, REN Bangfang, REN Yunwei, et al. Neoproterozoic magmatic records in the north Beishan Orogenic Belt: evidence of the gneissic granites from the Hazhu area, Inner Mongolia [J]. *Earth Science*, 2019, 44(1): 284–297.

- 牛亚卓, 魏建设, 史冀忠, 等. 甘肃北山地区北部上石炭统火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 2013, 32(11): 1720-1727.
- NIU Yazhuo, WEI Jianshe, SHI Jizhong, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Upper Carboniferous volcanic rocks from Beishan region in Gansu Province and its tectonic significance [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(11): 1720-1727.
- 苏桂芬, 冯丹, 刘凤民, 等. 岩石薄片全幅面采集技术研究与实验性采集[J]. 中国矿业, 2017, 26(S1): 310-312+318.
- SU Guifen, FENG Dan, LIU Fengmin, et al. Research and experimental collection of full-area acquisition technology of rock thin section[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S1): 310-312+318.
- 孙海瑞, 吕志成, 于晓飞, 等. 甘肃柳园地区晚三叠世辉绿岩脉年代学和地球化学研究及其对北山造山带早中生代构造演化的指示[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1755-1768.
- SUN Hairui, LV Zhicheng, YU Xiaofei, et al. Early Mesozoic tectonic evolution of Beishan Orogenic Belt: Constraints from chronology and geochemistry of the Late Triassic diabase dyke in Liuyuan area, Gansu Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1755-1768.
- 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, 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.
- 王浩. 北山造山带南部中新元古代岩浆—变质事件及其地质意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2022.
- WANG Hao. Meso-Neoproterozoic magmatic-metamorphic events and their geological significance in southern Beishan Orogenic Belt [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2022.
- 王怀涛. 中亚造山带南段北山构造-岩浆作用及其地质意义的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- WANG Huaitao. Tectono-magmatism and its geological significance in the beishan area of the southern part of the Central Asian Orogenic Belt [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- 王疆涛, 董云鹏, 曾忠诚, 等. 北山造山带南部黄草滩岩体年代学、地球化学及地质意义[J]. 现代地质, 2016, 30(5): 937-949.
- WANG Jiangtao, DONG Yunpeng, ZENG Zhongcheng, et al. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Huangcaotan pluton in the southern Beishan Orogenic Belt[J]. Geoscience, 2016, 30(5): 937-949.
- 王红杰, 白建科, 赵海波, 等. 甘肃北山南部早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自明舒井埃达克质侵入体锆石 U-Pb 年龄及地球化学的证据[J]. 地质通报, 2024, 43(2/3): 376-389.
- WANG Hongjie, BAI Jianke, ZHAO Haibo, et al. Early Paleozoic Paleo-Asian Ocean subduction in the southern Beishan, Gansu: Evidence of zircon U-Pb age and geochemical records from Mingshujing adakitic pluton[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(2/3): 376-389.
- 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.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185-220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 185-220.
- 肖文交, 宋东方, Windley B F, 等. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 1512-1545.
- XIAO Wenjiao, SONG Dongfang, Windley B F, et al. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49: 1512-1545.
- 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.
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. 科学通报, 2004, 49(14): 1403-1410.
- XU Ping, WU Fuyuan, XIE Liewen, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(14): 1403-1410.
- 许伟, 徐学义, 牛亚卓, 等. 北山南部早二叠世 A 型流纹岩地球化学特征及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 3011-3033.
- XU Wei, XU Xueyi, NIU Yazhuo, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Early Permian A-type rhyolite from southern Beishan orogen, NW China[J]. Acta Petrologica

- Sinica, 2018, 34(10): 3011–3033.
- 徐学义, 王洪亮, 马国林, 等. 西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石 Hf 同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 691–706.
- XU Xueyi, WANG Hongliang, MA Guolin, et al. Geochronology and Hf isotope characteristics of the Paleozoic granite in Nalati area, West Tianshan Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(6): 691–706.
- 杨合群, 李英, 杨建国, 等. 北山造山带的基本成矿特征[J]. 西北地质, 2006, 39(2): 78–95.
- YANG Hequn, LI Ying, YANG Jianguo, et al. Main metallogenic characteristics in the Beishan Orogen[J]. Northwestern Geology, 2006, 39(2): 78–95.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(22): 2411–2421.
- YUAN Honglin, WU Fuyuan, GAO Shan, et al. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(22): 2411–2421.
- 袁禹. 北山造山带大陆地壳的形成与演化[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- YUAN Yu. The continental crust formation and evolution of the Beishan Orogenic Belt [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- 赵宏刚, 梁积伟, 王驹, 等. 甘肃北山南带沙枣园复式岩体年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2020, 94(2): 396–425.
- ZHAO Honggang, LIANG Jiwei, WANG Ju, et al. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic significance of the Shazaoyuan Composite Pluton in the southern Beishan Mountains, Gansu Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(2): 396–425.
- 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. 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.
- 张新虎, 苏黎, 崔学军, 等. 甘肃北山造山带玉山钨矿成岩成矿时代及成矿机制[J]. 科学通报, 2008, 53(9): 1077–1084.
- 张元元, 郭召杰. 甘新交界红柳河蛇绿岩形成和侵位年龄的准确限定及大地构造意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 803–809.
- ZHANG Yuanyuan, GUO Zhaojie. Accurate constraint on formation and emplacement age of Hongliuhe ophiolite, boundary region between Xinjiang and Gansu Provinces and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 803–809.
- 郑荣国, 吴泰然, 张文, 等. 甘肃北山中带早泥盆世的构造-岩浆作用: 来自公婆泉花岗岩体年代学和地球化学证据[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(4): 594–607.
- ZHENG Rongguo, WU Tairan, ZHANG Wen, et al. Early Devonian tectono-magmatic events in the middle Beishan, Gansu province: Evidence from chronology and geochemistry of Gongpoquan granite[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(4): 594–607.
- 周国庆, 赵建新, 李献华. 内蒙古月牙山蛇绿岩特征及形成的构造背景: 地球化学和 Sr-Nd 同位素制约[J]. 地球化学, 2000, 29(2): 108–119.
- ZHOU Guoqing, ZHAO Jianxin, LI Xianhua. Characteristics of the Yueyashan ophiolite from western Nei Mongol and its tectonic setting: Geochemistry and Sm-Nd isotopic constraints[J]. Geochimica, 2000, 29(2): 108–119.
- 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 [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- 自然资源实物地质资料中心. 天山-北山成矿带那拉提-营毛沱地区地质矿产调查项目成果报告[R]. 2019: 1–640.
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(1): 1–15.
- ZUO Guochao, LIU Yike, LIU Chunyan. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Acta Geologica Gansu, 2003, 12(1): 1–15.
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Early-middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 4205–4225.
- Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002a, 192(1–2): 59–79.
- Andersen T, Griffin W, Pearson N. Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield: the Hf isotope evidence[J]. Journal of Petrology, 2002b, 43: 1725–1747.
- Andersen T, Griffin W L, Jackson S E, et al. Mid-Proterozoic magmatic arc evolution at the southwest margin of the Baltic Shield. Lithos, 2004, 73: 289–318.
- Ao S J, Xiao W J, Han C M, et al. Cambrian to early Silurian ophiolite and accretionary processes in the Beishan collage, NW China: implications for the architecture of the Southern Altaids[J]. Geological Magazine, 2012, 149: 606–625.
- Bao Z H, Cai K D, Sun M, et al. Continental crust melting induced by subduction initiation of the South Tianshan Ocean: Insight from the Latest Devonian granitic magmatism in the southern Yili

- Block, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 153: 100–117.
- Batchelor R A and Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1–4): 43–55.
- Blichert-Toft J and Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148: 243–258.
- Brander L, Söderlund U. Mesoproterozoic (1.47–1.44 Ga) orogenic magmatism in Fennoscandia; Baddeleyite U-Pb dating of a suite of massif-type anorthosite in S. Sweden[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 499–516.
- Cawood P A, Strachan R, Cutts K, et al. Neoproterozoic orogeny along the margin of Rodinia: Valhalla orogen, North Atlantic[J]. *Geology*, 2010, 38: 99–102.
- Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535–551.
- Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 1989, 23(1): 1–18.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 2033–2048.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 133–147.
- Gou L L and Zhang L F. Geochronology and petrogenesis of granitoids and associated mafic enclaves from Xiata in Chinese Southwest Tianshan: Implications for early Paleozoic tectonic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 115: 40–61.
- He Z Y, Zhang Z M, Zong K Q, et al. Neoproterozoic granulites from the northeastern margin of the Tarim Craton: Petrology, zircon U-Pb ages and implications for the Rodinia assembly[J]. *Precambrian Research*, 2012, 212–213: 21–33.
- He Z Y, Zhang Z M, Zong K Q, et al. Paleoproterozoic crustal evolution of the Tarim Craton: constrained by zircon U-Pb and Hf isotopes of meta-igneous rocks from Korla and Dunhuang[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 78: 54–70.
- He Z Y, Zhang Z M, Zong K Q, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic studies of the Xingxingxia Complex from Eastern Tianshan (NW China): Significance to the reconstruction and tectonics of the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2014, 190–191: 485–499.
- 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.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews of Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 27–62.
- Huang H, Wang T, Tong Y, et al. Rejuvenation of ancient microcontinents during accretionary orogenesis: Insights from the Yili Block and adjacent regions of the SW Central Asian Orogenic Belt[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103255.
- Li J, Wu C, Chen X, et al. Tectonic setting of metamorphism and exhumation of eclogite-facies rocks in the South Beishan orogen, northwestern China[J]. *Geosphere*, 2023, 19(1): 100–138.
- Lubnina N V, Mertanen S, Söderlund U, et al. A new key pole for the East European Craton at 1452 Ma: Palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia)[J]. *Precambrian Research*, 2010, 183: 442–462.
- Ludwig K R. ISOPLLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2003, 4: 1–70.
- Ma X X, Shu L S, Meert J G, et al. The Paleozoic evolution of Central Tianshan: Geochemical and geochronological evidence[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 797–819.
- Marjorie W. Igneous Petrogenesis[J]. London: Unwin Hyman Inc., 1989, 153–226.
- Maniar P D and Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 635–643.
- Mao Q G, Xiao W J, Windley B F, et al. The Liuyuan complex in the Beishan, NW China: A Carboniferous-Permian ophiolitic forearc sliver in the southern Altaids[J]. *Geological Magazine*, 2012, 149(3): 483–506.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 1994, 37: 215–224.
- Niu Y Z, Liu C Y, Shi G R, et al. Unconformity-bounded Upper Paleozoic megasequences in the Beishan Region (NW China) and implications for the timing of the Paleo-Asian Ocean closure [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, doi: 10.1016/j.jseaes.2018.06.019.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956–983.
- Peter D K and Roland M. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 327–341.
- Petersson A, Scherstén A, Andersson J, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopes from the eastern part of the Sveconorwegian Orogen,

- SW Sweden: implications for the growth of Fennoscandia. Geological Society, London, Special Publications, 2015, 389: 281–303.
- Shi Y R, Jian P, Kröner A, et al. Zircon ages and Hf isotopic compositions of plutonic rocks from the Central Tianshan (Xinjiang, northwest China) and their significance for early to mid-Palaeozoic crustal evolution[J]. International Geology Review, 2014, 56: 1413–1434.
- Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219: 311–324.
- 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, 2013, 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.
- Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [M]. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Ocean Basins. Geological Society of London, Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- Vervoort J D, Patchett P J, Gehrels G E, et al. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. Nature, 1996, 379: 624–627.
- Wang B R, Yang X S, Li S C, et al. Age, depositional environment, and tectonic significance of an Early Neoproterozoic volcano-sedimentary sequence in the eastern Beishan orogenic belt, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Geological Journal, 2021a, 156: 1346–1357.
- Wang B R, Yang X S, Li S C, et al. Geochronology, geochemistry, and tectonic implications of early Neoproterozoic granitic rocks from the eastern Beishan Orogenic Belt, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Precambrian Research, 2021b, 352: 106016.
- Whalen J, Currie K, Chappell B. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407–419.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. American Journal of Science, 2010, 310(10): 1553–1594.
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, et al. Late Paleozoic to Early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186: 94–128.
- Yin J Y, Chen W, Xiao W J, et al. The source and tectonic implications of late Carboniferous–early Permian A-type granites and dikes from the eastern Alatau Mountains, Xinjiang: geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints[J]. International Geology Review, 2016, 59: 1310–1323.
- Yuan Y, Zong K Q, He Z Y, et al. Geochemical and geochronological evidence for a former early Neoproterozoic microcontinent in the South Beishan Orogenic Belt, southernmost Central Asian Orogenic Belt[J]. Precambrian Research, 2015, 266: 409–424.
- Yuan Y, Zong K Q, He Z Y, et al. Paleozoic crustal growth and tectonic evolution of the Northern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2018, 302–303: 189–202.
- Yuan Y, Zong K Q, Cawood P A, et al. Implication of Mesoproterozoic (~ 1.4 Ga) Magmatism within microcontinents along the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Precambrian Research, 2019, 327: 314–326.
- Zheng R G, Xiao W J, Li J L, et al. A Silurian-early Devonian slab window in the southern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from high-Mg diorites, adakites and granitoids in the western Central Beishan region, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 153: 75–99.
- Zhong L L, Wang B, Shu L S, et al. Structural overprints of early Paleozoic arc-related intrusive rocks in the Chinese Central Tianshan: Implications for Paleozoic accretionary tectonics in SW Central Asian Orogenic Belts[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 194–217.
- Zhong L L, Wang B, Alexeiev D V, et al. Paleozoic multi-stage accretionary evolution of the SW Chinese Tianshan: New constraints from plutonic complex in the Nalati Range[J]. Gondwana Research, 2017, 45: 254–274.
- Zong K, Liu Y, Zhang Z, et al. The generation and evolution of Archean continental crust in the Dunhuang block, northeastern Tarim craton, northwestern China[J]. Precambrian Research, 2013, 235: 251–263.