



引文格式: 吴纪修, 袁彦伟, 李广栋, 等. 商丹洋中寒武世洋内俯冲作用: 来自关子镇蛇绿混杂岩大洋斜长花岗岩的证据[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 270–284. DOI: 10.12401/j.nwg.2025041

Citation: WU Jixiu, YUAN Yanwei, LI Guangdong, et al. Early Cambrian Intra-Oceanic Subduction of the Paleo-Shangdan Ocean: New Evidences from the Oceanic Plagiogranite in the Guanzi Town Ophiolite Melange[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 270–284. DOI: 10.12401/j.nwg.2025041

商丹洋中寒武世洋内俯冲作用: 来自关子镇蛇绿混杂岩大洋斜长花岗岩的证据

吴纪修¹, 袁彦伟², 李广栋³, 王晓赛¹, 毕志伟³

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 甘肃省矿产资源储量评审中心, 甘肃 兰州 730000;
3. 河北省区域地质调查院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 在关子镇蛇绿混杂岩带的黑湾一带新识别出一套花岗闪长岩-英云闪长岩的岩石组合, 厘定其形成机制对商丹洋俯冲消减及碰撞闭合时限等问题的研究具有重要意义。笔者对片麻状花岗闪长岩和变质英云闪长岩开展了岩石学、全岩地球化学研究, 对片麻状花岗闪长岩开展了 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素、全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素研究。结果显示, 片麻状花岗闪长岩和变质英云闪长岩稀土和微量元素含量低, 变质英云闪长岩具显著 Eu 正异常, 且二者均具大洋斜长花岗岩特征; 获得片麻状花岗闪长岩年龄为 (512.6 ± 2.0) Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+8.9 \sim +13.8$, 显示其岩浆源区为亏损地幔; 花岗闪长岩的 I_{Sr} 值为 $0.7046 \sim 0.7053$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $+2.55 \sim +3.08$ 。结合区域构造演化, 认为该套大洋斜长花岗岩为新生地幔玄武质岩石在低温 ($602.9 \sim 707.4$ °C) 低压 (< 0.2 G Pa) 条件下部分熔融形成的酸性岩浆侵位而成, 形成于中寒武世早期与商丹洋俯冲有关的岛弧环境。

关键词: 大洋斜长花岗岩; 商丹洋; 部分熔融; 俯冲作用; 关子镇

中图分类号: P588.1; P597.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0270-15

Early Cambrian Intra-Oceanic Subduction of the Paleo-Shangdan Ocean: New Evidences from the Oceanic Plagiogranite in the Guanzi Town Ophiolite Melange

WU Jixiu¹, YUAN Yanwei², LI Guangdong³, WANG Xiaosai¹, BI Zhiwei³

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 2. Gansu Assessment Center of Mineral Resources Reserves, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Hebei Regional Geological Survey Institute, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: A series of quartz granodiorite-granodiorite rock assemblage has been identified in Heiwan area of the Guanzi Town ophiolite mélangé. In order to determine the formation mechanism of them, the petrology and whole rock geochemistry of gneissic granodiorite and metamorphic tonalite were conducted, and the zircon U-

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2026-01-23; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“共和-略阳地区区域地质调查”(DD20190072)资助。

作者简介: 吴纪修(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 从事地质矿产及钻探工艺研究工作。E-mail: 272139943@qq.com。

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

Pb dating, Lu-Hf isotope, Rb-Sr and Sm-Nd isotope of gneissic granodiorite were conducted. The results show that gneissic granodiorite and metamorphic tonalite have low contents of rare earth and trace elements, and metamorphic tonalite has obvious Eu positive anomaly, and both of them have the characteristics of oceanic plagiogranite. The age of granodiorite obtained is 512.6 ± 2.0 Ma, and the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value varies from +8.9 to +13.8, indicating that its magma source area is depleted mantle. The I_{Sr} value of granodiorite ranges from 0.704 6 to 0.705 3, and the $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value ranges from +2.55 to +3.08. Combined with the regional tectonic evolution, this set of ocean plagiogranite was formed by the emplacement of acidic magma formed by partial melting of basaltic rocks in the mantle at low temperature ($602.9 \sim 707.4$ °C) and low pressure (< 0.2 GPa), and was formed in the island arc environment related to the subduction of Shangdan Ocean in the early Middle Cambrian.

Keywords: oceanic plagiogranite; Shangdan Ocean; partial melting; subduction; Guanzi town

大洋斜长花岗岩一词最早由 Coleman et al. (1975) 提出, 用来描述在蛇绿岩中与镁铁质岩石有密切共生关系的浅色岩, 如闪长岩、英云闪长岩、奥长花岗岩和钠长花岗岩, 其组成以浅色矿物斜长石和石英为主, 含少量铁镁质矿物, 且具高 Si, 中 Al, 富 Na, 贫 K 的地球化学特征。关于大洋斜长花岗岩的成因问题, 早期普遍认为是洋中脊玄武岩(MORB)结晶分异的产物 (Aldiss, 1981)。然而, 不同学者先后提出其成因为铁镁质洋壳部分熔融或辉长岩和方辉橄榄岩先后部分熔融的观点 (Rollinson, 2009; France et al., 2010); 其形成环境也不仅限于洋中脊, 可以是板块俯冲带和弧后裂谷 (Pedersen et al., 1984)。俯冲起始和前弧伸展是古俯冲带的重要构造过程 (Chen et al., 2014), 一般与海洋岩石圈的负浮力和板片后退有关。此外, 俯冲起始可导致大洋板块和上覆沉积物的部分熔融, 导致酸性岩和高镁安山岩的形成 (Yang, 2022)。

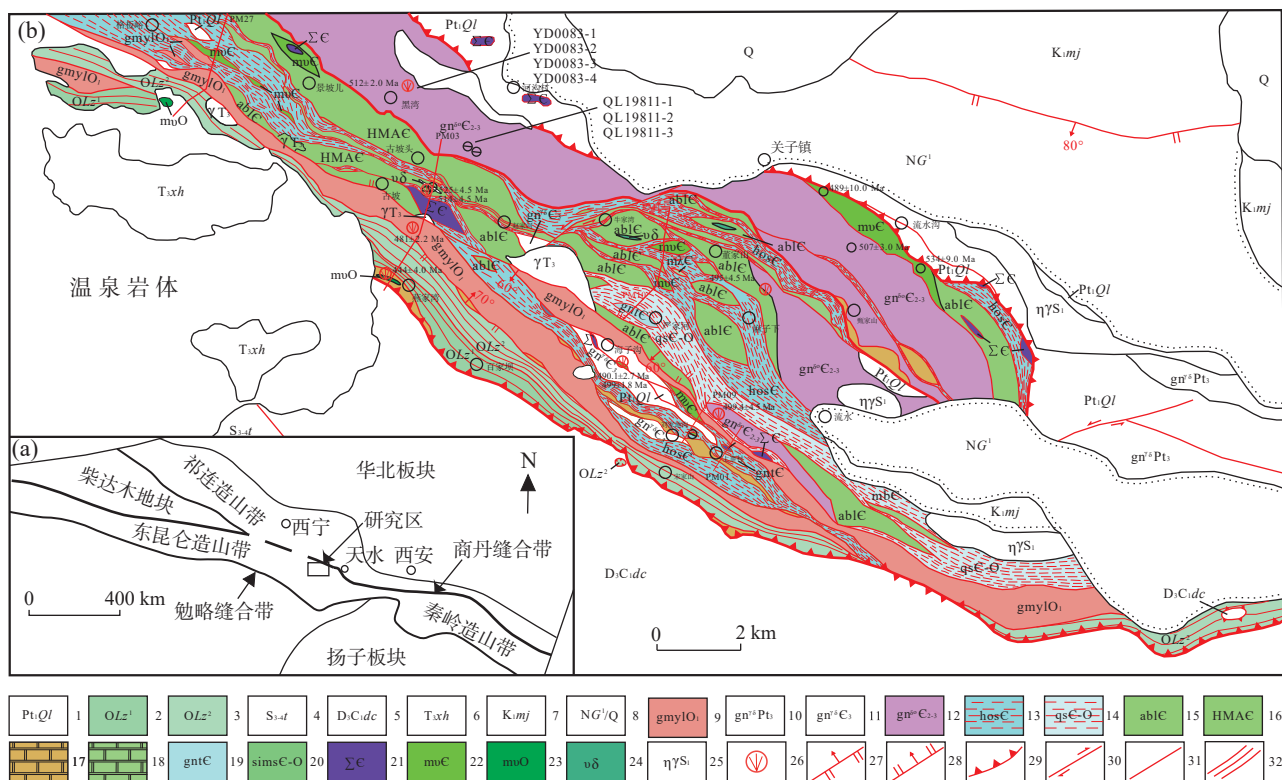
关子镇蛇绿混杂岩是天水-武山地区蛇绿混杂岩的重要组成部分, 主要由蛇纹岩(变质橄榄岩)、变辉石岩(包括阳起石岩)、斜长角闪片岩(变质基性火山岩)、变中细粒辉长岩等组成, 是商丹缝合带的西延 (裴先治等, 2004; 董云鹏等, 2008; 李王晔, 2008; 刘军峰, 2008; 李源, 2011; 操雨森等, 2020)。裴先治等 (2004) 首先厘定了镇蛇绿混杂岩, 并获得辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 (499.7 ± 1.8) Ma, 认为岩石具 N-MORB 的特征, 形成于岛弧环境, 是西秦岭北缘李子园镇-关子镇-武山洋盆扩张过程中岩浆活动的产物。杨钊等 (2006) 在关子镇东沟一带获得与变质基性火山岩紧密伴生的变质辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 471 Ma, 据此认为商丹古洋盆存在的时限可延续至 470 Ma。李王晔等 (2007) 获得蛇绿岩中辉长岩和闪长岩的锆石

SHRIMP U-Pb 年龄分别为 (534 ± 9) Ma 和 (517 ± 8) Ma, 认为关子镇蛇绿岩形成于洋中脊环境。毕志伟等 (2022) 获得关子镇蛇绿混杂岩中辉石石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 (514 ± 4.5) Ma, 形成于商丹洋俯冲时的弧前环境。吴纪修等 (2020, 2021a) 在海子沟一带获得变质堆晶辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 (489.6 ± 1.1) Ma, 在燕家湾一带获得变质辉长岩 U-Pb 年龄为 (444 ± 4) Ma。以上资料显示蛇绿岩的形成时代主要为早寒武世—晚奥陶世。笔者在关子镇地区开展了 1:5 万关子镇幅、四门镇幅区域地质调查以及关子镇蛇绿混杂岩 1:1 万专项调查工作, 在混杂带内新识别出一套中酸性侵入岩组合, 主要为片麻状花岗闪长岩和变质英云闪长岩。通过对其开展了地球化学、锆石 U-Pb 年代学、原位 Hf 同位素和全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素研究, 探讨了其岩石成因、构造环境和地质意义, 以期对商丹洋的俯冲消亡时间提供约束。

1 地质背景及岩体特征

研究区位于柴达木-华北板块和羌塘-扬子-华南板块的接合部位, 是古亚洲构造域、特提斯构造域和太平洋构造域复合叠加的构造部位 (图 1a)。以 NW-SE 向纵贯全区中部的关子镇蛇绿混杂岩带为界, 北东侧属祁连-北秦岭加里东造山带, 南西属中秦岭新元古代—晚古生代裂陷大陆边缘夏河-礼县陆缘沉积区。

区域地层主要出露古元古代秦岭岩群、新元古代木其滩岩组、寒武纪—奥陶系关子镇蛇绿混杂岩、早奥陶世李子园群、志留纪太阳寺组、泥盆纪-石炭纪大草滩组、三叠纪小河子组、白垩纪麦积山组、新近纪、



1.秦岭群; 2.李子园群一岩组; 3.李子园群二岩组; 4.太阳寺组; 5.大草滩组; 6.小河子组; 7.麦积山组; 8.甘肃群/第四系; 9.早奥陶世花岗质糜棱岩; 10.新元古代片麻状花岗闪长岩; 11.晚寒武世片麻状花岗闪长岩类; 12.中晚寒武世片麻状石英闪长岩类; 13.中寒武世大洋斜长花岗岩类; 14.强片理化斜长角闪岩、绿泥阳起片岩; 15.强片理化变粒岩、云母片岩; 16.斜长角闪岩; 17.古元古界大理岩; 18.寒武纪大理岩; 19.寒武纪变粒岩; 20.薄层状石英阳起片岩、绿泥阳起片岩; 21.变质超基性岩; 22.寒武纪变质辉长岩; 23.奥陶纪辉长岩; 24.辉长闪长岩; 25.早志留世二长花岗岩; 26.同位素采样位置; 27.逆断裂; 28.正断层; 29.逆冲推覆构造; 30.右型走滑断层; 31.性质不明断层; 32.韧性剪切带

图1 关子镇蛇绿构造混杂岩带地质简图

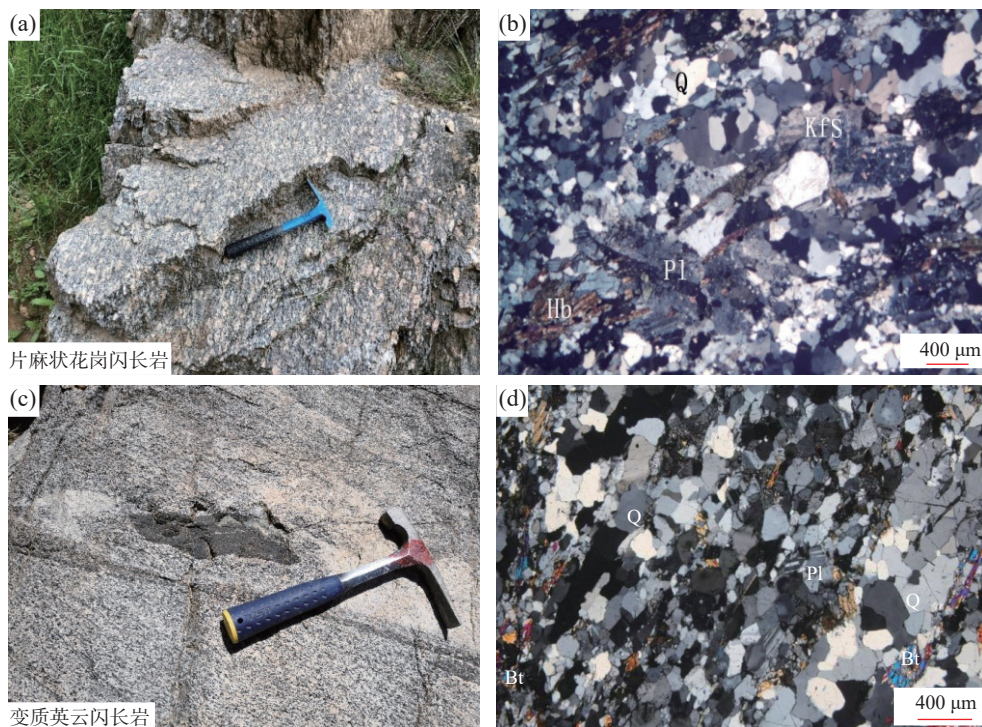
Fig. 1 Geological sketch map of the ophiolite tectonic melange belt in Guanzi town

第四纪等(吴纪修等, 2020, 2021a, 2021b; 毕志伟等, 2022)。关子镇蛇绿混杂岩北界为蛇绿岩带北界断裂, 南界为蛇绿岩带南界断裂, 整体与区域构造线方向一致, 呈 NW-SE 向带状展布, 延伸约 30 km, 往 NW 和 SE 延伸出区外, 出露宽度为 2~9 km, 整体形态呈现中部宽、北西和南东部较窄的透镜状(图 1b), 双向逆冲推覆于北东侧秦岭群和南西侧大草滩组之上, 角度不整合于麦积山组以及甘肃群之下, 并被花岗质糜棱岩侵入(吴纪修等, 2020, 2021a, 2021b; 图 1b)。

关子镇蛇绿混杂岩带由基质和岩块组成, 基质是具有强烈变形、强片理化特征的岩石, 包括强片理化斜长角闪岩、角闪片岩和强片理化变粒岩、云母片岩两大类。岩块是指夹持在基质内、时代不同、岩性各异、变形较弱的“无根”地质体。区内岩块岩性较为复杂, 多数属于岩石组合, 少数为单一的岩性, 整体可以分为 3 大类, 其中蛇纹岩、辉长岩、斜长角闪岩岩块

为蛇绿岩组成部分; 寒武纪—奥陶纪变粒岩、大理岩、变质流纹岩(变质安山岩)、层状石英阳起片岩(石英角闪片岩、绿泥阳起片岩)等属于岛弧沉积—火山体系; 花岗质片麻岩、石英大理岩、变粒岩等属于原华北地台变质基底部分。

笔者新识别出的花岗闪长岩—英云闪长岩的岩石组合呈构造岩片产出, 与关子镇蛇绿混杂岩带中蛇绿岩紧密共生, 在关子镇黑湾一带出露规模较大, 其中见有闪长岩、角闪岩等中性、超基性岩的包体, 接触界线或截然, 或渐变过渡。片麻状花岗闪长岩为灰白色, 片麻状构造, 花岗结构。主要组成矿物为斜长石(~33%)、钾长石(~12%)、石英(~28%), 角闪石(~22%)、黑云母(~4%)和其他副矿物(~6%), 整体粒径为 0.5~2.0 mm, 主要集中在 0.8~1.2 mm(图 2a、图 2b)。斜长石呈板状, 半自形晶, 粒径为 0.5~1.0 mm。钾长石呈他形粒状晶, 粒径为 0.5~1.5 mm。石英为不



Q. 石英; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Hb. 角闪石; Bt. 黑云母

图2 片麻状花岗闪长岩和变质英云闪长岩野外(a、c)及镜下特征(b、d)

Fig. 2 (a,c) Outcrops and (b, d) microscope characteristics of gneiss granodiorite and metamorphic tonalite

规则他形粒状,彼此呈齿状镶嵌,呈集合体分布于斜长石和钾长石之间,消光不均匀,单体粒径为0.2~1.0 mm不等。黑云母呈鳞片状,单体粒径为0.5~1.0 mm;角闪石呈墨绿色,分布不均,暗色矿物集合体在岩石中呈断断续续的定向排列,其间被浅色粒状矿物分开。副矿物磷灰石,金属矿物常包裹在暗色矿物之中。

变质英云闪长岩为浅灰色,片麻状构造,粒状变晶结构。主要组成矿物为斜长石(60%~65%)、石英(~25%)、角闪石(~10%)、黑云母(3%~5%)、其它副矿物(~2%)(图2c、图2d)。斜长石呈他形粒状,镜下鉴定为其为中长石。石英呈他形粒状,可见波状消光。角闪石呈柱状,见于斜长石晶内。黑云母呈片状,与角闪石混杂。副矿物为磷灰石、榍石和少量金属矿物。

2 样品采集与测试方法

样品随野外调查和剖面测试采集(图1b),选择4件蚀变弱、风化弱的片麻状花岗闪长岩样品和3件变质英云闪长岩样品进行全岩地球化学分析,并对1件片麻状花岗闪长岩(YD0083-1)开展了锆石 U-Pb 定年、

Lu-Hf 同位素,全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析。

2.1 全岩地球化学分析

全岩地球化学测试分析由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,室内将样品手工碎至1~5 mm,轮流用稀硝酸与稀盐酸浸泡清洗,烘干后用不锈钢钵研磨至200目用于化学分析。主量元素分析(除FeO)采用Panalytical公司PW440型X荧光光谱仪(XRF)测定,精度在1%以内,FeO单独采用湿法测试。微量元素和稀土元素采用ThermoFisher公司X-Series p型电感耦合等离子质谱仪(ICPMS)测定,测试精度在5%以内。

2.2 锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素

锆石的挑选、制靶、背散射(BES)和阴极发光图像(CL)拍照由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。锆石 U-Pb 同位素定年和原位 Lu-Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。U-Pb 年代分析 GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e,激光束斑和频率分别为 32 μm 和 10 Hz,内标为国际锆石标样 91500,对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2010)

完成。锆石 Hf 同位素分析激光剥蚀系统为 Geolas HD, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus, 激光束斑和能量输出密度分别为 $44\text{ }\mu\text{m}$ 和 7.0 J/cm^2 , 测试位置与 U-Pb 定年点位相同或靠近, 国际锆石标样 CJ-1 作为 Lu-Hf 同位素测试的监控。

2.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测试在武汉上谱测试分析有限公司完成, 采用的仪器为美国 Thermo Fisher Scientific 公司的 MC-ICP-MS (Neptune Plus)。Sr 同位素质量分馏校正采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 标准化, 本次分析中 Sr 同位素标样 NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分析测试值为 $0.710243\pm 11(2\sigma, n=4)$, 与推荐值 $0.710241\pm 12(2\sigma)$ 在误差范围内一致 (Thirlwall, 1991)。Nd 同位素分析采用多接收等离子质谱仪 MC-ICP-MS (Neptune), 样品 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 标准化。Nd 同位素标样 JNDi-1 的测定值为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512117\pm$

$06(2\sigma, n=5)$, 与推荐值 $0.512115\pm 07(2\sigma)$ 在误差范围内一致 (Tanaka et al., 2000)。

3 分析结果

3.1 全岩地球化学

全岩地球化学测试结果 (表 1) 显示, 片麻状花岗闪长岩和变质英云闪长岩样品 SiO_2 含量分别为 $69.45\%\sim 70.13\%$ 和 $73.18\%\sim 75.21\%$, TiO_2 含量分别为 $0.21\%\sim 0.24\%$ 和 0.03% , CaO 含量分别为 $4.57\%\sim 6.29\%$ 和 $3.9\%\sim 4.13\%$, Na_2O 分别为 $1.92\%\sim 3.47\%$ 和 $1.96\%\sim 2.67\%$ 。在硅碱图解中 (图 3a) 片麻状花岗闪长岩落在花岗闪长岩区, 变质英云闪长岩落在花岗岩区, 这与岩相学特征一致; 在 An-Ab-Or 图解中所有样品均落至英云闪长岩区 (3b)。两种岩石均具有低 K 的特征, 且变质英云闪长岩具显著的高 Si (图 3c)。花岗闪长

表 1 关子镇大洋斜长花岗岩类主量元素 (%) 和微量元素 (10^{-6}) 含量

Tab. 1 Major element (%) and trace element (10^{-6}) analyses of the oceanic plagiogranites in Guanzi town

样号	YD0083-1	YD0083-2	YD0083-3	YD0083-4	QL19811-1	QL19811-2	QL19811-3
岩性	片麻状花岗闪长岩				变质英云闪长岩		
SiO_2	69.81	70.13	69.47	70.02	73.18	73.97	75.21
Al_2O_3	14.47	14.11	14.16	13.74	14.32	14.77	13.66
TiO_2	0.21	0.24	0.23	0.22	0.03	0.03	0.03
Fe_2O_3	2.34	2.49	2.18	1.60	2.09	2.08	2
FeO	1.94	1.72	2.48	2.80	1.75	1.65	1.85
CaO	4.57	6.29	5.09	5.01	4.13	4.08	3.9
MgO	1.55	1.11	1.73	1.88	1.09	1.15	0.88
K_2O	0.60	0.66	0.41	0.41	0.2	0.19	0.17
Na_2O	3.47	1.92	3.28	3.12	2.22	1.96	2.67
MnO	0.089	0.085	0.109	0.126	0.028	0.029	0.024
P_2O_5	0.050	0.051	0.052	0.046	0.014	0.013	0.013
LOI	0.62	0.91	0.47	0.63	0.56	0.48	0.35
Total	99.72	99.73	99.66	99.62	99.61	100.40	100.76
V	85.4	91.0	92.8	89.6	6.01	4.68	4.4
Cr	5.55	5.52	5.72	5.73	8.38	12.3	10.7
Co	8.43	5.65	10.4	10.8	4.9	4.87	3.22
Ni	4.75	4.40	4.86	5.24	8.84	15	14.8
Rb	19.2	15.7	11.5	11.7	8.79	7.86	6.67
Sr	107	249	102	105	103	93.8	88.3
Zr	65.7	53.9	64.6	64.5	17.9	12.3	15.9
Nb	1.22	1.69	1.40	1.34	0.53	0.43	0.45
Cd	0.059	0.029	0.052	0.054	0.023	0.028	0.015
Cs	11.0	5.08	5.58	5.54	2.3	2.08	2.16
Ba	94.9	84.9	66.0	69.5	61.6	52.7	42.1
Hf	2.06	1.82	1.99	2.17	0.56	0.39	0.51

续表 1

样号	YD0083-1	YD0083-2	YD0083-3	YD0083-4	QL19811-1	QL19811-2	QL19811-3
Ta	0.13	0.22	0.67	0.14	0.41	0.29	0.29
Pb	3.10	2.96	2.86	3.08	6.96	6.8	5.87
Th	1.14	1.50	1.19	1.22	0.19	0.15	0.14
U	0.35	0.85	0.37	0.36	0.065	0.063	0.07
Y	11.1	13.5	12.0	12.4	0.93	0.86	0.78
La	3.66	4.93	3.51	3.13	1.04	0.9	0.99
Ce	7.96	10.2	7.56	7.46	1.81	1.6	1.74
Pr	0.98	1.30	1.01	0.95	0.19	0.16	0.19
Nd	4.04	5.45	4.38	4.07	0.69	0.61	0.73
Sm	1.08	1.41	1.16	1.21	0.14	0.12	0.11
Eu	0.34	0.45	0.36	0.38	0.21	0.19	0.2
Gd	1.21	1.57	1.28	1.34	0.14	0.13	0.12
Tb	0.24	0.31	0.26	0.28	0.02	0.02	0.02
Dy	1.77	2.21	1.87	2.02	0.14	0.13	0.12
Ho	0.38	0.48	0.42	0.47	0.033	0.033	0.023
Er	1.18	1.46	1.26	1.35	0.11	0.1	0.091
Tm	0.23	0.29	0.25	0.26	0.023	0.017	0.018
Yb	1.51	1.87	1.57	1.72	0.14	0.14	0.12
Lu	0.26	0.31	0.27	0.29	0.026	0.026	0.02

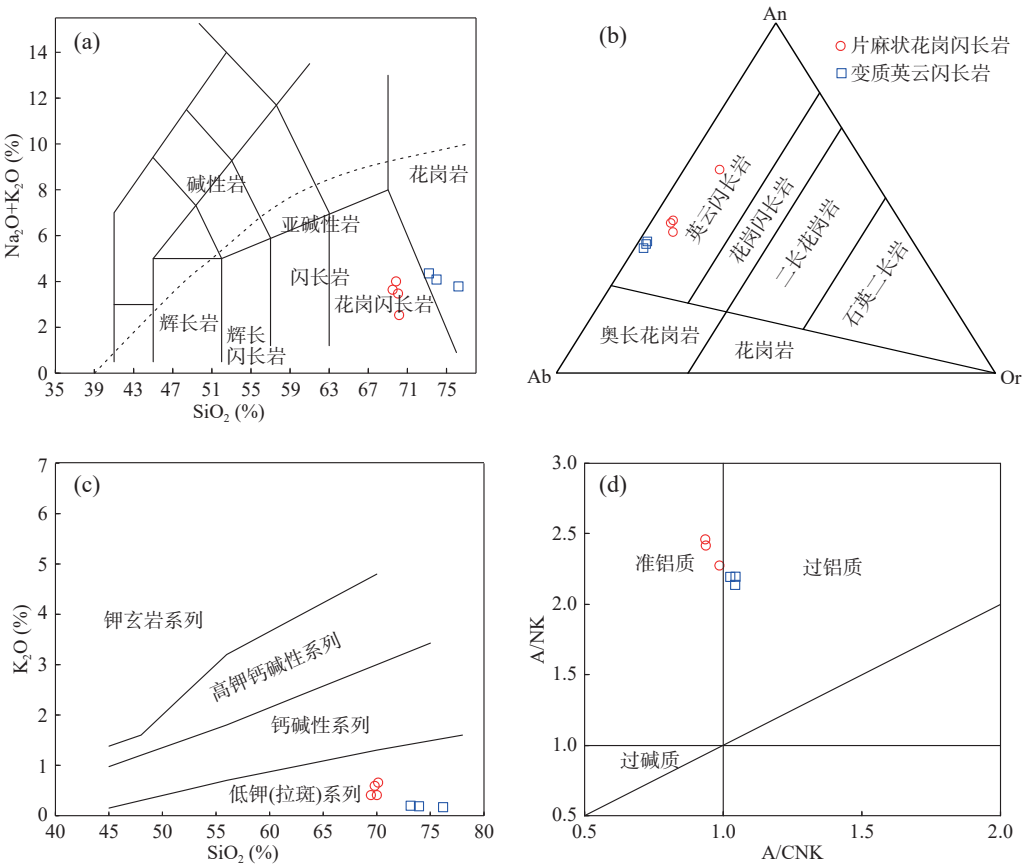


图3 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)图解(a; 底图据 Le Bas et al., 1986)、An-Ab-Or 分类图解(b; 底图据 Middlemost, 1994)、 SiO_2 - K_2O 图解(c; 底图据 Roberts and Clemens, 1993)、A/CNK-A/NK(d; 底图据 Frost et al., 2001)

Fig. 3 (a) SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) diagram, (b) An-Ab-Or diagram, (c) SiO_2 - K_2O diagram, (d) A/CNK-A/NK diagram

岩的 A/CNK 均小于 1, 为准铝质系列, 变质英云闪长岩的 A/CNK 为 1.03~1.04, 为准铝质系列(图 3d)。

所有样品的稀土总量明显偏低, 片麻状花岗闪长岩稀土总量为 $24.84\times10^{-6}\sim32.24\times10^{-6}$, 在稀土元素配分图上为一组近水平的曲线(图 4a), 轻稀土略有富集至轻度亏损, 重稀土相对富集, 显示无明显 Ce 异常。变质英云闪长岩稀土总量与球粒陨石相当, 为

$4.18\times10^{-6}\sim4.71\times10^{-6}$, 总体呈右倾的配分曲线, 轻稀土富集, 重稀土相对亏损, LREE/HREE 值为 6.01~7.44, $(La/Yb)_N$ 值为 4.33~5.56, 无明显 Ce 异常, 显著正 Eu 异常, δEu 值为 4.54~5.30。在洋脊花岗岩片麻状花岗闪长岩与变质英云闪长岩具相似的微量元素配分模式上(图 4b), 大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 相对富集, 而高场强元素 Nb、Y、Zr、Nb、Yb 等相对亏损。

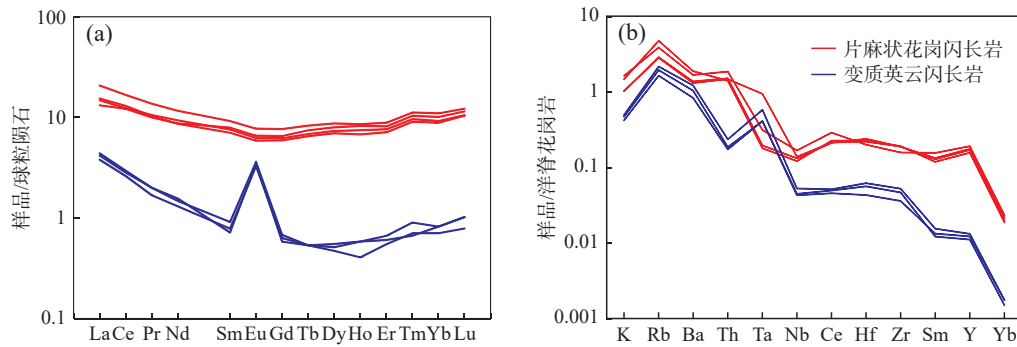


图4 关子镇大洋斜长花岗岩稀土配分曲线(a; 标准值据 Sun et al., 1989)、微量元素蛛网图(b; 标准值据 Pearce et al., 1984)
Fig. 4 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) trace element spider diagram of oceanic plagiogranite from the Guanzi town

3.2 锆石 U-Pb 定年

片麻状花岗闪长岩(YD0083-1)中选取 25 颗锆石进行 U-Pb 同位素年代学测试(表 2)。根据锆石阴极发光图像(图 5a), 锆石颗粒呈灰白色, 自形-半自形柱状晶, 颗粒大小约为 100~150 μm , 长宽比为 1 : 1.2~1 : 6, 围绕核部具有明显的震荡环带, 个别发育扇形

分带或平行晶体长轴的生长条带。锆石 Th/U 值为 0.18~0.52, 具典型的岩浆锆石特征(胡运行等, 2025; 房明举等, 2026; 牛永静等, 2026)。锆石年龄集中分布在谐和线上(图 5b), $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 $(512.6\pm 2.0)Ma$ (MSWD =1.7, n=25), 代表片麻状石英闪长岩的成岩年龄, 表明其形成时代为中寒武世。

表 2 黑湾片麻状花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年数据

Tab. 2 LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from Heiwan gneissic granodiorite

点号	含量 (10^{-6})			同位素比值						年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$\pm 1\sigma$	$^{207}Pb/^{235}U$	$\pm 1\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U$	$\pm 1\sigma$	$^{207}Pb/^{235}U$	$\pm 1\sigma$	$^{206}Pb/^{238}U$	$\pm 1\sigma$
1	60.56	167.31	667.18	0.058 4	0.000 6	0.671 3	0.008 6	0.083 3	0.000 6	521.48	5.20	515.97	3.83
2	76.96	410.48	782.03	0.059 2	0.000 6	0.683 1	0.006 8	0.083 8	0.000 5	528.64	4.08	518.53	3.17
3	19.14	66.23	212.25	0.058 7	0.000 9	0.658 3	0.010 3	0.081 4	0.000 5	513.59	6.28	504.53	3.28
4	69.80	210.76	762.97	0.058 3	0.000 6	0.673 9	0.008 2	0.083 9	0.000 7	523.11	4.98	519.08	4.03
5	13.45	31.61	152.75	0.056 7	0.000 9	0.642 4	0.011 0	0.082 2	0.000 6	503.79	6.80	509.29	3.74
6	19.17	46.50	217.08	0.057 0	0.000 9	0.644 6	0.009 9	0.082 0	0.000 5	505.15	6.12	508.28	3.25
7	21.91	76.48	242.69	0.058 4	0.001 0	0.655 9	0.011 7	0.081 4	0.000 6	512.10	7.17	504.68	3.53
8	17.29	47.54	195.13	0.057 0	0.000 8	0.641 6	0.009 8	0.081 6	0.000 5	503.29	6.08	505.67	3.18
9	11.01	24.03	124.95	0.059 1	0.001 2	0.671 6	0.014 2	0.082 4	0.000 7	521.71	8.60	510.48	3.90
10	23.31	85.61	254.29	0.058 7	0.000 8	0.669 1	0.009 6	0.082 7	0.000 5	520.16	5.87	512.02	3.19
11	27.39	108.97	300.47	0.058 5	0.000 9	0.660 9	0.010 3	0.082 0	0.000 7	515.18	6.33	507.95	4.27
12	16.20	47.14	181.49	0.058 4	0.001 1	0.663 8	0.013 1	0.082 4	0.000 7	516.93	8.01	510.37	4.43

续表 2

点号	含量 (10 ⁻⁶)			同位素比值						年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ
13	15.41	35.02	173.21	0.059 1	0.001 2	0.678 7	0.012 5	0.083 5	0.000 8	525.96	7.55	517.20	4.57
14	39.13	117.29	429.18	0.056 7	0.000 8	0.657 5	0.009 1	0.083 8	0.000 5	513.07	5.60	518.90	2.93
15	18.57	54.61	205.11	0.057 2	0.000 9	0.657 9	0.010 6	0.083 4	0.000 6	513.33	6.50	516.57	3.63
16	20.59	61.23	227.07	0.059 6	0.001 0	0.679 7	0.011 0	0.082 8	0.000 6	526.61	6.66	513.06	3.81
17	16.16	48.41	179.19	0.060 2	0.001 1	0.690 8	0.012 3	0.083 4	0.000 7	533.31	7.40	516.48	3.95
18	24.98	91.21	271.24	0.056 2	0.001 0	0.645 5	0.012 2	0.083 2	0.000 6	505.73	7.50	515.29	3.47
19	20.82	59.87	233.03	0.057 3	0.001 0	0.651 8	0.011 6	0.082 5	0.000 6	509.59	7.12	511.00	3.43
20	9.94	24.33	111.37	0.060 4	0.001 3	0.693 5	0.016 7	0.083 2	0.000 7	534.88	9.99	515.08	4.11
21	16.23	44.93	181.60	0.057 6	0.001 0	0.651 5	0.012 3	0.082 0	0.000 6	509.39	7.54	508.12	3.51
22	17.10	34.26	195.04	0.056 9	0.001 0	0.650 2	0.012 8	0.082 8	0.000 6	508.60	7.90	512.61	3.79
23	11.86	25.73	134.42	0.056 4	0.001 3	0.650 7	0.014 9	0.083 8	0.001 0	508.88	9.19	518.81	5.75
24	31.02	145.37	328.52	0.057 9	0.000 8	0.664 5	0.009 6	0.083 3	0.000 6	517.37	5.88	515.59	3.81
25	13.32	30.58	149.10	0.059 0	0.001 2	0.677 1	0.013 2	0.083 3	0.000 6	525.01	7.99	515.74	3.52

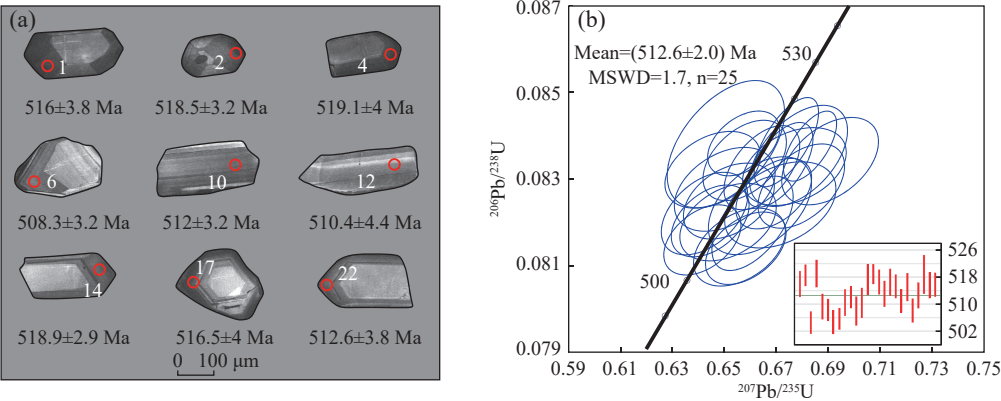


图5 片麻状花岗闪长岩典型锆石 CL 图像(a)和 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig. 5 (a) Cathodoluminescence images for representative zircons and (b) LA-ICP-MS U-Pb ages concordant diagram of zircons

3.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析点位置和锆石 U-Pb 测试点相同或靠近, 获得 25 个锆石 Lu-Hf 同位素数据(表 3)。锆石的 ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 值为 0.026 775~0.104 497, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.001 449~0.005 138(小于 0.002), 表明放射性成因 ¹⁷⁶Hf 很少(董美玲等, 2026; 王旭东等, 2026)。¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 734~0.282 873, ε_{Hf}(*t*) 值为 9~13.8, 集中分布在球粒陨石线和亏损地幔线之间(图 6a), 暗示岩石岩浆起源于亏损地幔或新生壳源物质部分熔融(吴福元等, 2007)。锆石模式年龄 *t*_{DM} 为 570~784 Ma, *t*_{DM2} 为 599~916 Ma。

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素

样品 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素结果(表 4、表 5)显示,

片麻状花岗闪长岩的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.705 23~0.705 83, I_s 值为 0.704 63~0.705 25, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值为 0.512 786~0.512 944, ε_{Nd}(*t*) 值为 2.55~3.08, 在 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-ε_{Nd}(*t*) 图解中(图 6b)集中分布在 OIB 与 IAB 的混合区。

4 讨论

4.1 岩石类型

片麻状花岗闪长岩、变质英云闪长岩均与关子镇蛇绿岩密切共生, 既有侵入接触关系, 又显示构造混杂接触关系。片麻状花岗闪长岩含少量钾长石, 富石英和暗色矿物(角闪石、黑云母); 变质英云闪长岩不含钾长石, 富长英质组分。片麻状花岗闪长岩、变质

表 3 黑湾片麻状花岗闪长岩 Lu-Hf 同位素分析结果

Tab. 3 Lu-Hf isotope analysis results from Heiwan gneissic granodiorite

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}	T_{DM}^{C}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	0.051 144	0.002 773	0.282 824	0.000 023	0.282 797	1.8	12.3	637	701	-0.92
2	0.026 775	0.001 449	0.282 767	0.000 018	0.282 753	-0.2	10.8	696	798	-0.96
3	0.057 789	0.002 921	0.282 821	0.000 021	0.282 794	1.7	11.9	644	716	-0.91
4	0.044 323	0.002 396	0.282 800	0.000 017	0.282 776	1.0	11.6	667	746	-0.93
5	0.047 764	0.002 505	0.282 772	0.000 019	0.282 748	0.0	10.4	709	816	-0.92
6	0.051 943	0.002 745	0.282 790	0.000 024	0.282 764	0.6	10.9	687	780	-0.92
7	0.060 491	0.003 071	0.282 798	0.000 022	0.282 769	0.9	11.0	682	772	-0.91
8	0.059 425	0.003 032	0.282 780	0.000 024	0.282 751	0.3	10.4	708	811	-0.91
9	0.035 034	0.001 904	0.282 734	0.000 022	0.282 716	-1.3	9.3	753	887	-0.94
10	0.058 898	0.002 939	0.282 850	0.000 020	0.282 822	2.8	13.0	601	647	-0.91
11	0.066 947	0.003 369	0.282 796	0.000 022	0.282 764	0.9	10.9	690	780	-0.90
12	0.054 413	0.002 864	0.282 814	0.000 022	0.282 786	1.5	11.7	654	729	-0.91
13	0.044 036	0.002 454	0.282 774	0.000 023	0.282 751	0.1	10.6	705	805	-0.93
14	0.041 217	0.002 231	0.282 822	0.000 019	0.282 800	1.8	12.4	631	692	-0.93
15	0.065 686	0.003 327	0.282 734	0.000 027	0.282 701	-1.4	8.9	784	916	-0.90
16	0.062 830	0.003 148	0.282 873	0.000 023	0.282 843	3.6	13.8	570	599	-0.91
17	0.040 421	0.002 143	0.282 801	0.000 022	0.282 780	1.0	11.7	660	738	-0.94
18	0.061 846	0.003 070	0.282 797	0.000 021	0.282 767	0.9	11.2	684	769	-0.91
19	0.054 747	0.002 832	0.282 822	0.000 025	0.282 795	1.8	12.1	641	708	-0.91
20	0.030 461	0.001 590	0.282 814	0.000 022	0.282 799	1.5	12.3	631	697	-0.95
21	0.032 058	0.001 764	0.282 798	0.000 024	0.282 781	0.9	11.5	658	742	-0.95
22	0.028 286	0.001 523	0.282 788	0.000 023	0.282 773	0.6	11.3	668	757	-0.95
23	0.033 625	0.001 857	0.282 795	0.000 021	0.282 777	0.8	11.6	664	745	-0.94
24	0.104 497	0.005 138	0.282 795	0.000 034	0.282 745	0.8	10.4	729	819	-0.85
25	0.039 648	0.002 148	0.282 758	0.000 026	0.282 737	-0.5	10.1	723	837	-0.94

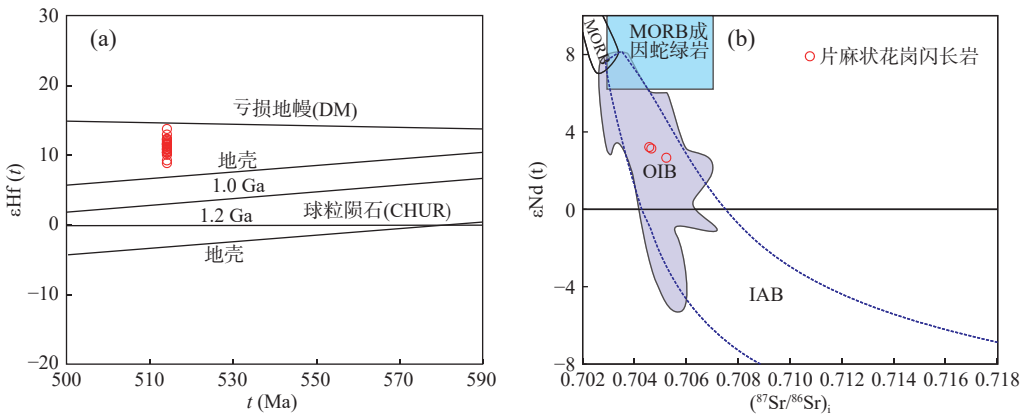


图6 t-εHf(t) (a)和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解 (b; 底图据 Griffin et al., 2000)

Fig. 6 (a) t-εHf(t) diagram and (b) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of oceanic plagiogranite

表 4 黑湾片麻状花岗闪长岩 Rb-Sr 同位素分析结果

Tab. 4 Rb-Sr isotope analysis results from Heiwan gneissic granodiorite

样品编号	岩石类型	Rb(10 ⁻⁶)	Sr(10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	I _{Sr}
GZ-10	花岗闪长岩	3.087	110.4	0.081	0.705 32	0.704 73
GZ-17		2.975	7.5	0.08	0.705 83	0.705 25
YD0083-1		3.109 4	130.98	0.081 2	0.705 22	0.704 63

注: GZ-10、GZ-17来源于李王晔(2007)。

表 5 黑湾片麻状花岗闪长岩 Sm-Nd 同位素分析结果

Tab. 5 Sm-Nd isotope analysis results from Heiwan gneissic granodiorite

样品编号	岩石类型	Sm(10 ⁻⁶)	Nd(10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	ε _{Nd} (t)
GZ-10	花岗闪长岩	1.77	4.575	0.234	0.512 918	3.02
GZ-17		1.091	3.257	0.202	0.512 786	2.55
YD0083-1		1.905 8	4.839	0.241	0.512 944	3.08

注: GZ-10、GZ-17来源于李王晔(2007)。

英云闪长岩在岩石化学上显示富 Na、贫 K 的特征,在 SiO₂/Al₂O₃-A/CNK 图解中(图 7a),样品位于典型大洋斜长花岗岩区域附近(Sarvothaman, 1993);在 SiO₂-K₂O 图解中(图 7b),样品基本落入大洋斜长花岗岩范围(Coleman et al., 1975)。结合微量元素特征,判别本区该套岩石组合为大洋斜长花岗岩。

4.2 岩石成因

目前主要有 4 种模式解释大洋斜长花岗岩的成因:①铁镁质岩部分熔融模型(Grimes et al., 2013);②玄武质岩浆结晶分异模型(Hunter et al., 1978);③奥长花岗岩/英云闪长岩部分熔融模型(Popov et al., 2002);④岩浆不混溶模型(Shastry et al., 2002; 康磊等, 2015)。关子镇地区还未发现更早的斜长花岗岩/英云闪长岩,因此不适合用岩浆不混溶模型或者早期奥长花岗岩/英云闪长岩部分熔融模式来解释。大洋斜长

花岗岩与关子镇蛇绿岩密切共生,暗示其成因可能为玄武质岩浆结晶分异或铁镁质岩部分熔融。通常, SiO₂ 与 La 或 Rb 含量关系可以判定结晶分异和部分熔融,如果结晶分异为主导, SiO₂ 含量则正相关于 La 或 Rb 含量;反之,当部分熔融时, SiO₂ 含量则负相关于 La 或 Rb 含量。关子镇大洋斜长花岗岩的 SiO₂ 含量与 La 无明显的正相关性,表明其成因并非主要来自结晶分异作用(图 8a)。此外,在 Rb/La-Rb 图解(图 8b)中,其显示出显著的部分熔融的演化趋势。

部分熔融形成的大洋斜长花岗岩多见于角闪岩相韧性剪切带中(Flagler et al., 1991),具有低 Al、高 Si、稀土配分曲线右倾及正 Eu 异常的特征(Flagler, 1991)。岩体的模式年龄明显大于其形成年龄,支持了铁镁质岩石部分熔融的成因模式,所有样品在 AFM-CFM 图中均落于变质玄武岩部分熔融区域(图 9a)。此外,关

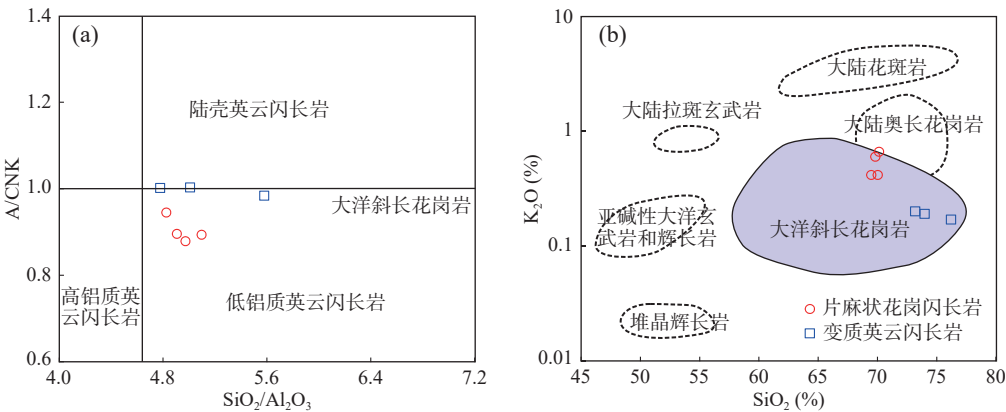


图7 SiO₂/Al₂O₃-A/CNK 图解(a;底图 Sarvothaman, 1993)、SiO₂-K₂O 图解(b;底图据 Coleman et al., 1975)
Fig. 7 (a) SiO₂/Al₂O₃-A/CNK diagram and (b) SiO₂-K₂O diagram

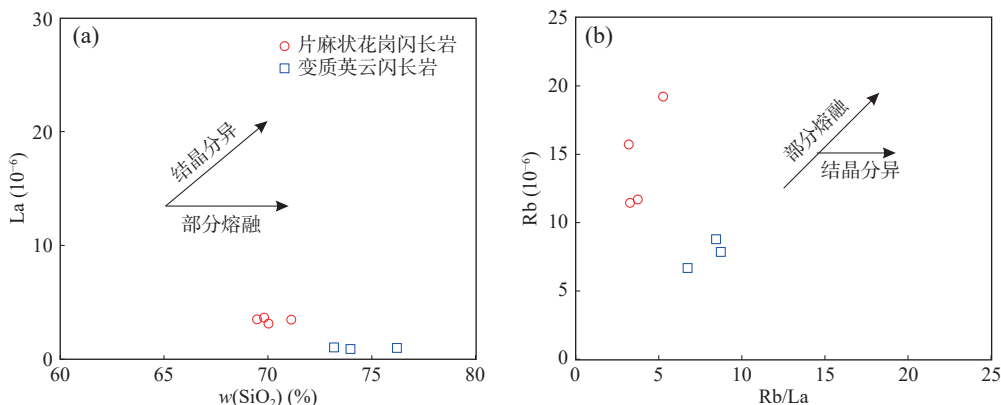


图8 关子镇大洋斜长花岗岩成因判别图(底图据 Brophy et al., 2009; Schiano et al., 2010)

Fig. 8 Diagrams of petrogenesis of oceanic plagiogranite in Guanzi town area

子大洋斜长花岗岩的 TiO_2 含量较低(0.03%~0.24%), 样品在 SiO_2 - TiO_2 图(图 9b)中均落点于含水条件下辉长岩部分熔融范围, TiO_2 含量低于玄武质岩浆结晶分异和岩浆不混熔的底线, 是镁铁质洋壳部分熔融的产物(Koepke et al., 2007; Grimes et al., 2013)。

4.3 岩浆形成的温压条件

关子镇大洋斜长花岗岩以中等 Al_2O_3 、高 MgO 和正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为特征, 表现出亏损地幔源或新生壳源的地球化学亲和性。此外, 关子大洋斜长花岗岩低 Sr , 显示了低压熔融环境(张旗等, 2006)。实验岩石学证实, Al_2O_3 的含量与成岩压力正相关(Barker et al., 1976)。以 15% 为界, 当 Al_2O_3 的含量大于 15% 时, 指示熔融压力大于 1.6 GPa, 反之, 小于 1.6 GPa(Rapp et al., 1991)。关子镇大洋斜长花岗岩的 Al_2O_3 含量为 13.66%~14.77%, 平均值为 14.18%, 说明熔融压力小于 1.6 GPa。An-Ab-Qtz 三元共结压力曲线图(图 10)指示, 样品压力应小

于 0.2 GPa(Winter, 2001), 也印证了上述推论。

Watson et al.(1983)根据高温实验获得了锆石溶解度模拟公式: $T_{\text{Zr}}(^{\circ}\text{C}) = \{12\,900/[\ln D_{\text{Zr}}(496\,000/\text{熔体}) + 0.85M + 2\,195]\} - 273.15$, 式中的 D_{Zr} 为 Zr 分配系数。样品的 M 值为 1.35~1.58, 在推荐范围之内(0.9~1.7; Watson et al., 1983)。据此计算, 得出锆石温度约为 602.9~707.4 $^{\circ}\text{C}$, 且岩浆中发育继承锆石, 说明母岩浆中锆石已达饱和。因此, 602.9~707.4 $^{\circ}\text{C}$ 可代表原始岩浆的初始岩浆温度(Miller et al., 2003)。关子镇大洋斜长花岗岩的熔融环境为低压(<0.1 GPa)和低温(737~781 $^{\circ}\text{C}$), 并具有低 Sr 、高 Yb 的特征, 符合<0.8 GPa(650~800 $^{\circ}\text{C}$)条件下含水拉斑玄武岩的熔融环境, 其残留相应为斜长石+角闪石 $\pm$ 斜方辉石 $\pm$ 钛铁矿(无石榴子石; 张旗等, 2006)。

4.4 构造环境及地质意义

大洋斜长花岗岩的形成环境主要为洋中脊、板块

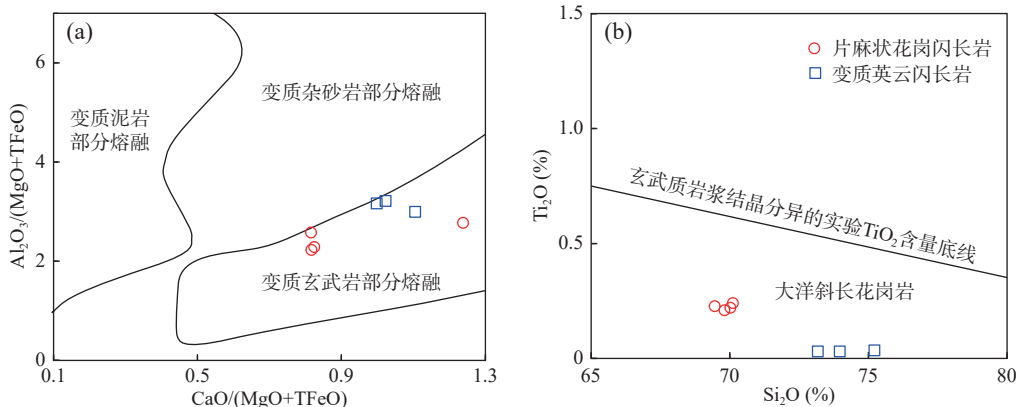


图9 AFM-CFM 源岩成因判定图解(a; 底图据 Altherr et al., 2000)、拉斑玄武岩系统中

富 SiO_2 实验熔体 SiO_2 - TiO_2 关系图(b; 底图据 Koepke et al., 2007)

Fig. 9 (a) Discrimination diagram of source rock genesis of ACF-CFM, and (b) TiO_2 - SiO_2 diagram on the basis of the experiments involving hydrous melting of mafic ocean crust and fractional crystallization of mid-ocean ridge basalt

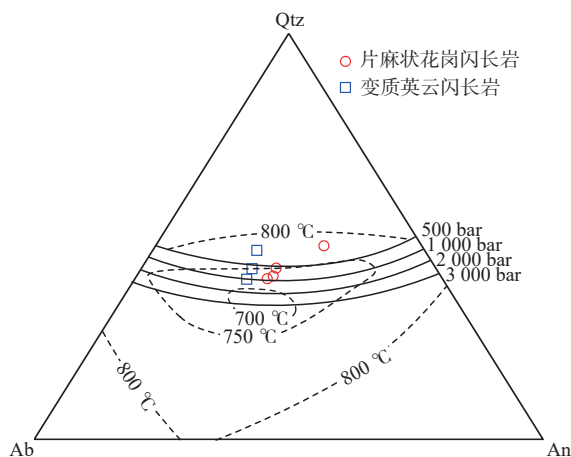


图10 An-Ab-Qtz 三元共结压力曲线图
(底图据 Winter, 2001)

Fig. 10 Ternary conjunction pressure curves of An-Ab-Qtz

俯冲带和弧后裂谷(Pedersen et al., 1984)。大洋中脊斜长花岗岩具有低的 K_2O 、 Al_2O_3 、Sr 含量及 Sr/Y 值, LREE 略有亏损, 明显区别于洋壳俯冲消减的高压环境下低钾玄武岩部分熔融形成的英云闪长岩、奥长花

岗岩和花岗闪长岩组成的 TTG 岩石组合(具高的 Al_2O_3 、Sr 含量, 低的 Y 含量, 高 Sr/Y 值及 LREE 富集)(Jiang et al., 2008)。关子镇大洋斜长花岗岩具中等的 Al 含量, 低的 K、Y 含量, 高 Sr/Y 值及 LREE 富集。在构造环境 Y-Nb 判别图解中(图 11a), 所有样品落在火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩范围内。在 Yb+Ta-Rb 图解中(图 11b)落在火山弧花岗岩区, 在 Yb-Ta 图解中(图 11c), 大部分落至火山岛弧花岗岩区, 少量在火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩界线附近, 因此, 结合区域构造背景初步认为关子镇大洋斜长花岗岩形成于岛弧构造背景。在花岗岩的 R1-R2 图解中(图 11d), 样品全部落入地幔分离的花岗岩范围内, 暗示关子镇大洋斜长花岗岩很可能是岩石圈地幔部分熔融所产生的拉斑玄武质岩浆上侵的产物, 这和上述分析的岩石成因类型是相符的。

关子镇蛇绿混杂岩是商丹蛇绿混杂岩的西延, 是原始特提斯洋的分支。原特提斯洋的最初关闭发生在约 500~460 Ma 期间, 导致几乎所有东亚板块首次汇聚拼合至冈瓦纳大陆的北缘。关子镇蛇绿混杂岩

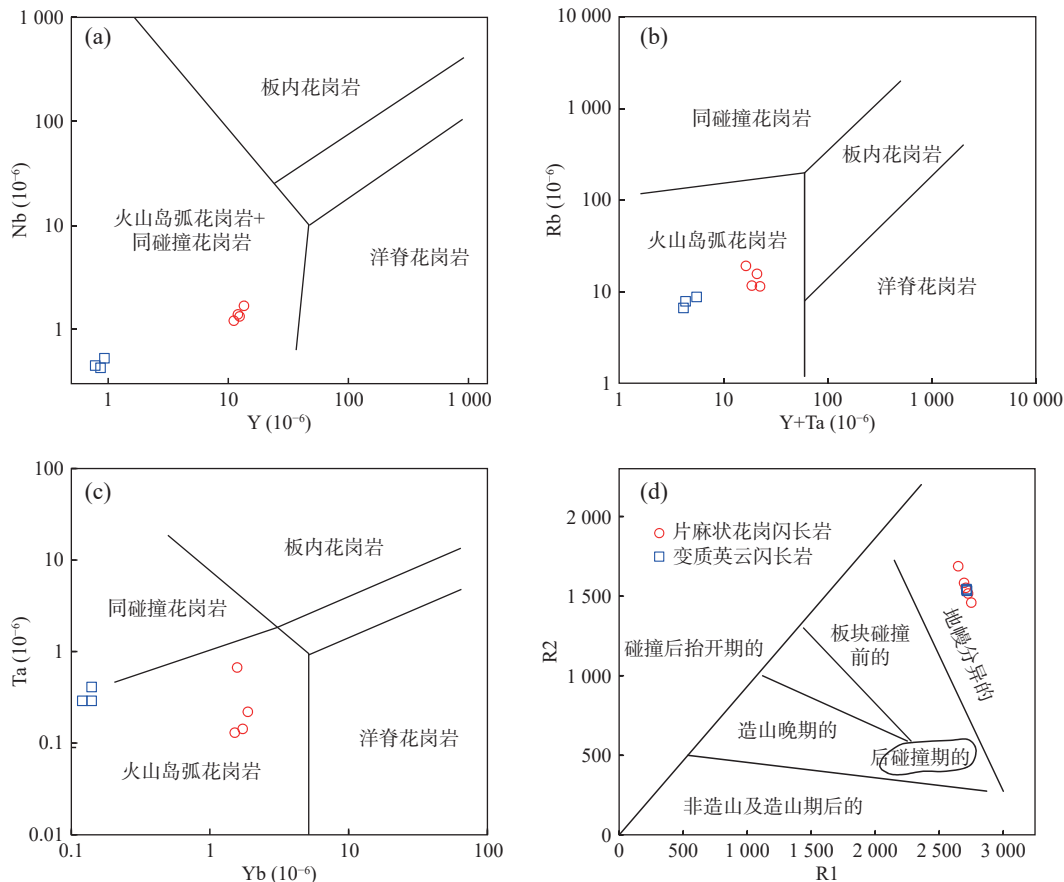


图11 关子镇大洋斜长花岗岩构造环境判别图解(a、b、c底图据 Pearce et al., 1984; d底图据 Batchelor et al., 1985)

Fig. 11 Tectonic setting discrimination diagrams of oceanic plagiogranite in Guanzi town

记录了商丹洋的初始俯冲的过程, 关子镇大洋斜长花岗岩形成年龄为 512.6 Ma, 意味着从中寒武世蛇绿岩及伴生大洋斜长花岗岩已开始形成, 大洋斜长花岗岩的出现暗示板块可能开始俯冲。Hf 同位素模式年龄为 570~784 Ma。结合上述讨论, 认为其源岩是新元古代晚期的来源于亏损地幔的玄武质岩石, 在中寒武世商丹洋开始洋内俯冲, 该套玄武质岩石发生部分熔融, 形成了中酸性-酸性岩浆, 岩浆侵位形成关子镇大洋斜长花岗岩。

5 结论

(1) 关子镇一带新发现的片麻状花岗闪长岩-变质英云闪长岩组合属大洋斜长花岗岩, 是与关子镇蛇绿岩密切共生的花岗质岩石。

(2) 大洋斜长花岗岩中获得锆石 U-Pb 年龄为 512.6 Ma, 代表了该套大洋斜长花岗岩以及伴生关子镇蛇绿岩形成于中寒武世。

(3) 大洋斜长花岗岩为地幔玄武质岩石在低压 (<0.2 GPa) 低温 (602.9~707.4 °C) 条件下部分熔融形成的酸性岩浆侵位而成, 形成于商丹洋早期与大洋板片俯冲有关的岛弧环境。

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):

- 毕志伟, 吴纪修, 张亚光, 等. 商丹洋早寒武世俯冲作用-来自甘肃关子镇蛇绿混杂岩古坡高镁安山岩的证据[J]. 地质通报, 2022, 41(5): 740-753.
- BI Zhiwei, WU Jixiu, ZHANG Yaguang, et al. Early Cambrian intraoceanic subduction of the Paleo-Shangdan Ocean: New evidences from the Gupo high-Mg andesite in the Guanzi Town ophiolite mélange[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(5): 740-753.
- 操雨森, 黄始琪, 周炜鉴, 等. 西秦岭天水关子镇变玄武岩的地球化学特征及大地构造环境[J]. 地质论评, 2020, 66(3): 625-636.
- CAO Yusen, HUANG Shiqi, ZHOU Weijian, et al. Geochemical characteristics and tectonic environment of metabasalts in Guanzizhen, Tianshui Western Qinling[J]. Geological Review, 2020, 66(3): 625-636.
- 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.
- 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.
- 董云鹏, 杨钊, 张国伟, 等. 西秦岭关子镇蛇绿岩地球化学及其大地构造意义[J]. 地质学报, 2008, 82(9): 1186-1194.
- DONG Yunpeng, YANG Zhao, ZHANG Guowei, et al. Geochemistry of the Ophiolite in the Guanzizhen Area, West Qinling and Its Tectonic Implications[J]. Acta Geological Sinica, 2008, 82(9): 1186-1194.
- 房明举, 段俊, 徐刚, 等. 扬子北缘喜神坝镁铁-超镁铁岩体成因与铜镍成矿潜力研究[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 209-227.
- FANG Mingju, DUAN Jun, XU Gang, et al. Genesis and Cu-Ni Mineralization Potential of the Xishenba Mafic-Ultramafic Intrusion in the Northern Margin of the Yangtze Block[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 209-227.
- 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.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑西北缘大洋斜长花岗岩带的岩石地球化学特征、成因及其构造环境[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2566-2582.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics, petrogenesis and tectonic setting of Oceanic plagiogranites belt in the northwestern margin of western Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(9): 2566-2582.
- 李王晔, 李曙光, 裴先治, 等. 西秦岭关子镇蛇绿混杂岩的地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2836-2844.
- LI Wangye, LI Shuguang, PEI Xianzhi, et al. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb ages of the Guanzizhen ophiolite complex, the Western Qinling orogen, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2836-2844.
- 李王晔. 西秦岭-东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧岩浆岩的年代学和地球化学研究-对特提斯洋演化的制约[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2008.
- LI Wangye. Geochronology and geochemistry of the ophiolites and island-arc-type igneous rocks in the Western Qinling orogen and the Eastern Kunlun orogen: Implication for the evolution of the

- Tethyan Ocean[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2008.
- 李源. 北秦岭造山带早古生代蛇绿岩与构造演化 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
- LI Yuan. Paleozoic Ophiolites and tectonic evolution of the North Qinling[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.
- 刘军峰. 秦岭商-丹构造带镁铁质-超镁铁质岩体研究及其地质意义 [D]. 西安: 西北大学, 2008.
- LIU Junfeng. Studies of mafic and ultramafic rocks along the Shan-Dan suture from Qinling orogenic belt and their implications [D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- 牛永静, 李凯旋, 杨高学, 等. 新疆西天山晚古生代花岗岩的岩石成因及构造意义 [J]. 西北地质, 2026, 59(3): 80-103.
- NIU Yongjing, LI Kaixuan, YANG Gaoxue, et al. Petrogenesis and Tectonic Significance of the Late Paleozoic Granites from the Western Tianshan, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 80-103.
- 裴先治, 李勇, 丁仁平, 等. 天水市幅 1: 25 万区域地质调查 (修测) 成果报告 [R]. 西安: 长安大学地质调查研究院, 2004.
- 王旭东, 姚金龙, 赵喜军, 等. 北阿尔金早古生代弧-盆体系重建: 来自沉积记录的约束 [J]. 西北地质, 2026, 59(3): 296-313.
- WANG Xudong, YAO Jinlong, ZHAO Xijun, et al. Delineating Early Paleozoic Trench-Arc-Basin System in the Northern Altyn Tagh Belt: Constraints from Sedimentary Records[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 296-313.
- 吴纪修, 王晓赛, 毕志伟, 等. 四门镇、关子镇 1: 5 万区域地质调查报告 [R]. 廊坊: 中国地质科学院勘探技术研究所, 2020.
- 吴纪修, 王晓赛, 王文, 等. 共和-略阳地区区域地质调查成果报告 [R]. 廊坊: 中国地质科学院勘探技术研究所, 2021a.
- 吴纪修, 王文, 黄增保, 等. 西秦岭温泉钼矿区含钼花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及岩浆物质来源讨论 [J]. 中国地质, 2021b, 48(5): 1596-1609.
- WU Jixiu, WANG Wen, HUANG Zengbao, et al. Zircon U-Pb ages, Hf isotope compositions and Discussion on the Source of Magmatic Material based on the Mo-bearing granite within the Wenquan molybdenum ore deposited in the West Qinling area[J]. Geology in China, 2021b, 48(5): 1596-1609.
- 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.
- 杨钊, 董云鹏, 柳小明, 等. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年 [J]. 地质通报, 2006, 25(11): 1321-1325.
- YANG Zhao, DONG Yunpeng, LIU Xiaoming, et al. LA- ICP- MS zircon U- Pb dating of gabbro in the Guanzizhen ophiolite, Tianshui, West Qinling, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11): 1321-1325.
- 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2249-2269.
- ZHANG Qi, WANG Yan, LI Chengdong, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(9): 2249-2269.
- Altherr R, Holl A, Heger E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 2000, 50(1-3): 51-73.
- Aldiss D T. Plagiogranites from the ocean crust and ophiolites[J]. Nature, 1981, 289(5798): 577-578.
- Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1-4): 43-55.
- Barker F, Arth J G. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemite-basalt suites[J]. Geology, 1976, 4: 596-600.
- Brophy J G. La-SiO₂ and Yb-SiO₂ systematics in mid-ocean ridge magmas: Implications for the origin of oceanic plagiogranite[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2009, 158(1): 99-111.
- Coleman R G, Peterman Z E. Oceanic plagiogranite[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(8): 1099-1108.
- Chen W T, Sun W H, Wang W, et al. "Grenvillian" intra-plate mafic magmatism in the southwestern Yangtze Block SW China[J]. Precambrian Research, 2014, 242: 138-153.
- Flagler P A, Spray J G. Generation of plagiogranite by amphibolite anatexis in oceanic shear zones[J]. Geology, 1991, 19(1): 70-73.
- France L, Koepke J, Ildefonse B, et al. Hydrous partial melting in the sheeted dike complex at fast spreading ridges: Experimental and natural observations[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(5): 683-704.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42(11): 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(1): 133-147.
- Grimes C B, Ushikubo T, Kozdon R, et al. Perspectives on the origin of plagiogranite in ophiolites from oxygen isotopes in zircon[J]. Lithos, 2013, 179(5): 48-66.
- Hunter D R, Barker F, Millard H T. The geochemical nature of the

- Archean ancient gneiss complex and granodiorite suite, Swaziland: A preliminary study[J]. *Precambrian Research*, 1978, 7(2): 105–127.
- Jiang Y H, Liao S Y, Yang W Z. An island arc origin of plagiogranites at Oyttag, western Kunlun orogen, northwest China: SHRIMP zircon U-Pb chronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and Paleozoic tectonic implications[J]. *Lithos*, 2008, 106(3–4): 323–335.
- Koepke J, Berndt J, Feig S T, et al. The formation of SiO₂-rich melts within the deep oceanic crust by hydrous partial melting of gabbros[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 153(1): 67–84.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1–2): 537–571.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27(3): 745–750.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Review*, 1994, 37: 215–224.
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529–532.
- Pedersen R B, Malpas J. The origin of oceanic plagiogranites from the karmoy ophiolite, western Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 88(1–2): 36–52.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A C. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956–983.
- Popov V S, Bogatov V I, Zhuravlev D Z. Sources of granite magmas and Middle and Southern Urals earth crust formation: Sm-Nd and Rb-Sr isotopic data[J]. *Petrology*, 2002, 10: 389–410.
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites[J]. *Precambrian Research*, 1991, 51(1–4): 1–25.
- Roberts M P, Clemens J D. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids[J]. *Geology*, 1993, 21: 825–828.
- Rollinson H. New models for the genesis of plagiogranites in the Oman ophiolite[J]. *Lithos*, 2009, 112(2–3): 603–614.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society Special Publication*, 1989, 42: 313–345.
- Sarvothaman H. The molar Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O) ratios as discriminant constraint for oceanic plagiogranites and continental trondhjemites[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 1993, 42(5): 513–522.
- Shastri A, Srivastava R K, Chandra R, et al. Geochemical characteristics and genesis of oceanic plagiogranites associated with south Andaman ophiolite suite, India: A late stage silicate liquid immiscible product[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2002, 59(3): 233–241.
- Schiano P, Monzier M, Eissen J P, et al. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 160(2): 297–312.
- Tanaka T, Togashi S, Kamioka H, et al. JNdi-1: A neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium[J]. *Chemical Geology*, 2000, 168: 279–281.
- Thirlwall M F. Long-term reproducibility of multicollector Sr and Nd isotope ratio[J]. *Chemical Geology*, 1991, 94(2): 85–104.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 69(2): 295–304.
- Winter J D. An introduction to igneous and metamorphic petrology [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- Yang Gaoxue. Subduction initiation triggered by collision: A review based on examples and models[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 232(2022): 1–29.