



引文格式: 何佳乐, 唐卫东, 刘天航, 等. 龙首山构造带罗城花岗闪长岩地质年代学、岩石成因和构造背景研究[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 52–67. DOI: 10.12401/j.nwg.2023153

Citation: HE Jiale, TANG Weidong, LIU Tianhang, et al. Study on Geochronology, Rock Genesis and Tectonic Background of Luo Cheng Granodiorite in Longshou Mountain Tectonic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 52–67. DOI: 10.12401/j.nwg.2023153

龙首山构造带罗城花岗闪长岩地质年代学、 岩石成因和构造背景研究

何佳乐¹, 唐卫东¹, 刘天航¹, 高永宝^{1,2}, 魏立勇¹, 范堡程^{1,2}, 于锴¹

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 阿拉善地块龙首山成矿带大地构造位置处于华北板块、祁连造山带及中亚造山带的结合部, 其所处构造环境的特殊性对区域构造演化及板块运动有着重大意义。该地区的岩浆演化及构造背景研究较为薄弱, 笔者对罗城黑云母花岗闪长岩开展了岩石地球化学和锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素研究工作, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年显示结果为 $(289 \pm 3) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.57$), 侵位时间为早二叠世。罗城花岗闪长岩为准铝质, 钙碱性系列, $\text{Mg}^\#$ 值介于 $0.64 \sim 0.66$, 显示 I 型花岗岩特征。研究区这些早二叠世花岗闪长岩显示出轻稀土元素相对富集和重稀土元素相对亏损的特征, LREE/HREE 值为 $4.20 \sim 5.30$, $(\text{La/Yb})_N$ 为 $3.69 \sim 5.46$, 并且具有轻微 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu}: 0.80 \sim 0.96$)。原始地幔标准化图解中, 这些样品相对富集大离子亲石元素 (Rb、Th 和 K 等), 亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti 和 P 等), 显示俯冲相关的弧岩浆地球化学特征。罗城地区早二叠世侵入岩具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($+4.37$ to $+6.88$) 和相对年轻的二阶段模式年龄 ($T_{(\text{DMC})}=808.6 \sim 952.5 \text{ Ma}$)。野外地质特征结合地球化学数据表明罗城花岗闪长岩为壳源岩浆与幔源岩浆发生混合作用的产物。结合区域背景和前言研究数据分析, 阿拉善西部龙首山构造带早二叠世时可能还存在与俯冲有关的弧岩浆活动。

关键词: 花岗闪长岩; 地球化学; Hf 同位素; 龙首山; 构造演化

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0052-16

Study on Geochronology, Rock Genesis and Tectonic Background of Luo Cheng Granodiorite in Longshou Mountain Tectonic Belt

HE Jiale¹, TANG Weidong¹, LIU Tianhang¹, GAO Yongbao^{1,2}, WEI Liyong¹, FAN Baocheng^{1,2}, YU Kai¹

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The geotectonic location of Longshou Mountain Metallogenic Belt of the Alxa Massif is at the junction of the North China Plate, the Qilian Orogenic Belt, and the Central Asian Orogenic Belt, and the particularity of the tectonic environment is of great significance to the regional tectonic evolution and plate movement. The

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2023-06-29; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 北山地区月牙山-合黎山一带萤石铜铅矿调查评价(ZD20220305)及陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0362)联合资助。

作者简介: 何佳乐(1993–), 男, 工程师, 学士, 矿产地质调查研究。E-mail: 18811307713@163.com。

magmatic evolution and tectonic background of this area are not well studied. The author has carried out studies on the rock geochemistry, zircon U-Pb dating, and Lu-Hf isotope of Luocheng biotite granodiorite. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows a value of $(289 \pm 3) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.57$), and the emplacement time of the rock is in the Early Permian. Luocheng Granodiorite is quasi aluminous, calc alkaline series, with $\text{Mg}^\#$ value between 0.64-0.66, showing the characteristics of I-type granite. These early Permian Granodiorite in the study area show the characteristics of relative enrichment of light REE and relative depletion of heavy REE, LREE/HREE ratio was 4.20-5.30, and $(\text{La/Yb})_N$ was 3.69-5.46, And it has a slight negative Eu anomaly (δEu : 0.80-0.96). In the standardized diagram of the primitive mantle, In the standardized diagram of the original mantle, these samples are relatively rich in large ion lithophile elements (Rb, Th, K, etc.) and depleted in high field strength elements (Nb, Ta, Ti, P, etc.), showing the geochemical characteristics of subduction related arc magmas. The early Permian intrusive rocks in the Luocheng area have positive ε The Hf (t) value (+4.37 to +6.88) and the relatively young two-stage mode age ($T_{(\text{DMC})}=808.6$ to 952.5 Ma). Field geological characteristics and geochemical data show that Luocheng Granodiorite is the product of mixing of crust derived magma and mantle derived magma. Based on the analysis of regional background and foreword research data, it is possible that arc magmatic activity related to subduction existed in the Longshoushan tectonic belt in the western part of Alxa during the Early Permian.

Keywords: granodiorite; geochemistry; Hf isotopic; LongShou Mountain; tectonic evolution

研究区南临祁连造山带, 北接中亚造山带, 其所处构造环境的特殊性对区域构造演化及板块运动有着重大意义。该地区岩浆演化期次及构造背景研究较为薄弱且存在较大争议, 前人通过对合黎山地区五坝和张家窑岩体锆石 U-Pb 年代学及同位素地球化学特征研究, 其年龄介于 $432 \sim 397 \text{ Ma}$, 为中志留世—早泥盆世, 认为阿拉善地块西南缘早古生代很可能受控于祁连造山带的构造演化, 处于后碰撞拉伸环境(王增振等, 2020); 通过对龙首山西山头窑地区三期岩体锆石 U-Pb 年代学研究, 其年龄介于 $304.3 \sim 281.2 \text{ Ma}$, 为晚石炭世—早二叠世, 处于弧后洋盆闭合过程, 是古亚洲洋向南俯冲的结果(董国强等, 2022); 而强利刚等(2019)认为龙首山地壳在晚古生代处于拉伸的稳定阶段。对合黎山地区岩浆岩形成时代及构造环境研究存在重要意义。龙首山成矿带区内侵入岩发育广泛, 主要为酸性、中酸性岩石, 主要岩性以花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩等为主(张甲民等, 2017), 前人对龙首山成矿带的研究工作主要以东段为主, 且主要集中在早古生代(牛宇奔等, 2018; 刘文恒等, 2019; 王增振等, 2020)。而不同构造环境下的侵入岩具有不同的地球化学特征及同位素特征, 能有效反映其岩浆源区及构造演化等重要信息。笔者在前人工作基础上对该区花岗闪长岩开展了锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及 Lu-Hf 同位素特征的研究, 确定该岩体形成时代并探讨这些黑云母花岗闪长岩的成因问题及龙首山成矿带西南缘构造环境特征。

1 区域地质概况

合黎山地处阿拉善地块龙首山成矿带西南缘, 大地构造位置属于华北板块西南边缘(图 1a)(谭文娟等, 2012), 北以龙首山北缘断裂与潮水中新生代断陷相邻(汤中立等, 1999), 南以南缘断裂与走廊过渡带分开。区内成矿条件有利(焦建刚等, 2007)。龙首山成矿带是中国西北重要的铀成矿带(王承花, 2010), 同时中国著名的金川镍矿也位于该成矿带内(强利刚等, 2019; 张照伟等, 2023)。

区内地质构造复杂, 次级构造发育, 逆冲构造及伸展构造叠加, 总体构造为 NWW 向(甘肃省地质局, 1974), 出露地层包括前震旦系龙首山群的角闪岩相—绿片岩相变质岩等中级区域变质岩系, 其与上覆地层均为不整合接触; 震旦系下统及中上统的云母石英片岩、变粒岩及变质砂岩、大理岩等为主的浅变质岩, 其下统与中—上统之间多为断层接触; 侏罗系青土井群的砂岩、砂砾岩等为主的陆源碎屑岩夹煤层, 其与上覆地层及下伏地层均为不整合接触; 白垩系以砂砾岩、泥岩等为主的碎屑岩; 第三系以砾岩、含砾砂岩为主的沉积岩及第四系松散堆积物(图 1b)。

测区内岩浆岩发育广泛, 主要为酸性、中酸性岩石为主, 侵入活动主要是在加里东中期及华力西期, 以华力西期侵入岩最为发育, 主要岩性以花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩等为主, 其中以花岗闪长岩出

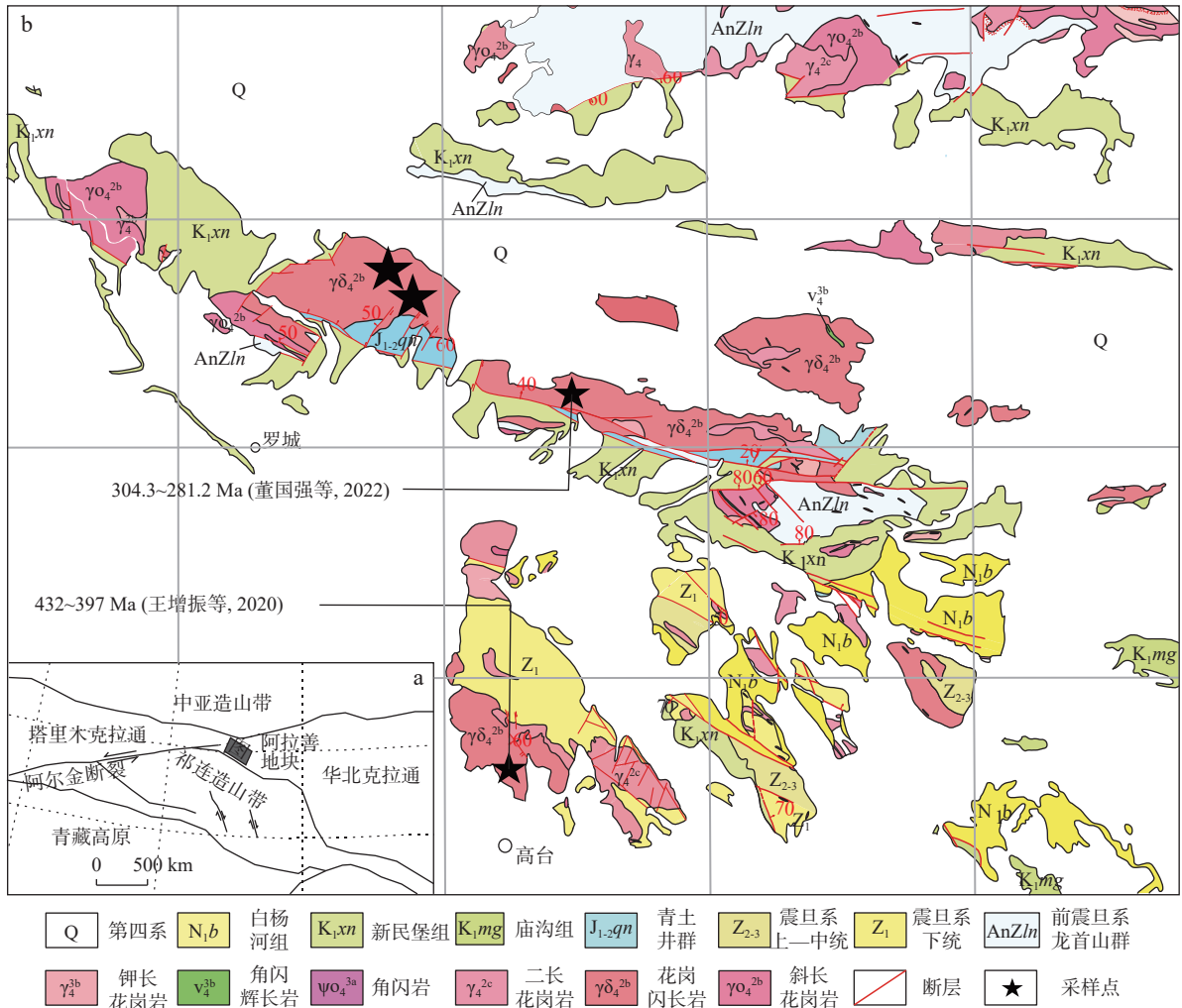


图1 阿拉善地块大地构造简图(a)及罗城地区地质简图(b)

Fig. 1 (a) Geostructural map of Alxa Block and (b) geological map of Luocheng Area

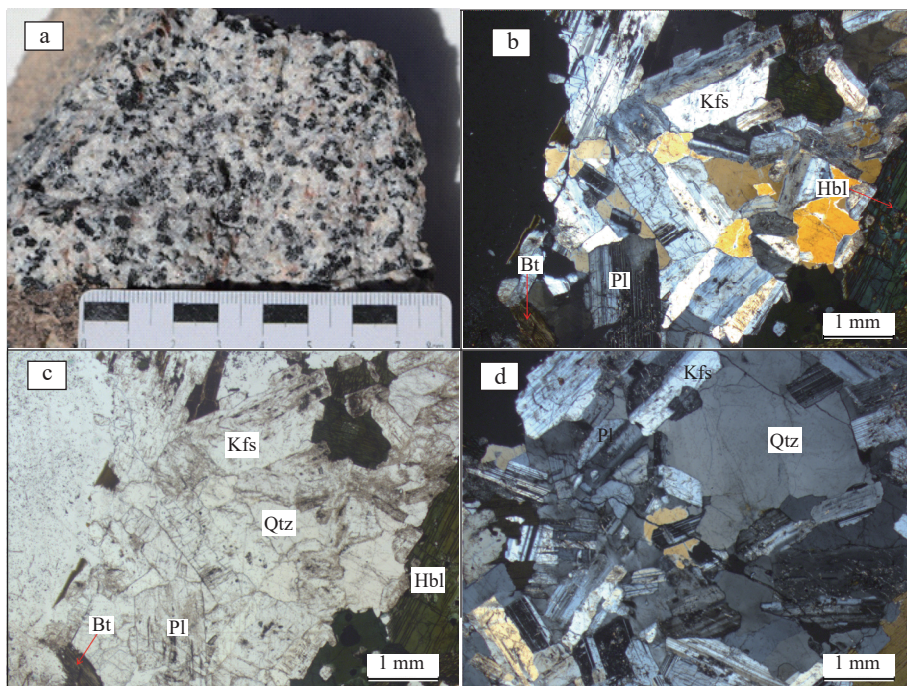
露最为广泛,其次为英云闪长岩。罗城岩体主要为花岗闪长岩发育,其中可见花岗岩、闪长岩呈脉状发育。区内五坝和张嘉窑岩体锆石 U-Pb 年代学年龄介于 432~397 Ma,为中志留世—早泥盆世(王增振等, 2020);西山头窑地区岩体锆石 U-Pb 年代学年龄介于 304.3~281.2 Ma,为晚石炭世—早二叠世。

2 样品采集及岩石学特征

罗城岩体主要位于甘肃省高台县罗城镇北侧,其岩性主要为黑云母花岗闪长岩,野外岩体出露较为完整,笔者选取了合黎山地区高台县罗城幅的黑云母花岗闪长岩进行锆石 U-Pb 定年分析,共采集样品 5 件,其中岩石年龄同位素样品 1 件,并在岩石年龄同位素样品采集处配套采集岩石地球化学样品 4 件。样品采集地理坐标: E 99°43'39", N 39°46'30"和

E 99°41'43", N 39°48'20"。为确保锆石数据准确性,样品均为未风化蚀变的新鲜岩石。

岩石新鲜面为灰白色,具半自形粒状结构,块状构造(图 2a)。主要矿物及含量:斜长石(45%),石英(20%),碱性长石(15%),普通角闪石(15%),黑云母(5%)。斜长石粒径约 0.30~1.30 mm,呈半形粒状、板状,具聚片双晶,表面浑浊,微裂隙发育,次生绢云母化,均匀分布。碱性长石粒径约 0.20~1.10,呈半自形板状,具卡式双晶,少量分布。石英粒径约 0.10~2.00 mm,呈他形粒状,波状消光,沿长石粒间分布。普通角闪石粒径约 0.20~1.60 mm,呈他形柱状,黄褐色,截面呈菱面体状,具角闪石式解理,绿泥石化,沿长英质粒间定向分布。黑云母粒径约 0.15~2.25 mm,呈鳞片状、片状,褐黄色-红褐色,沿长英质粒间定向分布。副矿物有磷灰石、绿帘石(图 2b、图 2c、图 2d)。



a.黑云母花岗闪长岩手标本; (b, d).正交偏光镜下特征; c.单偏光镜下特征;
Qtz.石英; Bt.黑云母; Pl.斜长石; Kfs.钾长石; Hbl.角闪石

图2 黑云母花岗闪长岩手标本及镜下照片

Fig. 2 Biotite granodiorite hand specimen and microscopic photograph

3 样品分析方法

样品的锆石挑选、制靶、CL照相由西安瑞石地质科技有限公司完成,采用标准重矿物分离技术分选出重矿物,随后在双目镜下挑选出锆石颗粒,将不同特征的锆石颗粒粘在双面胶上,并用无色透明的环氧树脂固定,待其固化之后将表面抛光至锆石内部暴露。然后拍摄阴极发光图像、透射光图像和反射光图像,选取分析点位。

锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成分析在中国地质调查局西安地质调查中心岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。锆石 U-Pb 定年在 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行,样品采用激光剥蚀等离子体质谱仪原位分析锆石微区的铀铅比值($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) (李艳广等, 2015) 并通过 Glitter 计算程序计算锆石的年龄及标准偏差;应用 Iso-plot (Ludwig, 2003) 计算程序对锆石样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄在谐和图上进行投图,并计算谐和年龄测点的加权平均值。

锆石 Hf 同位素组成运用 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪和 GeolasPro 型激光剥蚀系统联

用的方法完成 (袁洪林等, 2007), 所选测试位置均与锆石 U-Pb 测点位置相近,测试束斑直径为 32 μm , 采用国际标准锆石 91500 进行监控和样品外部校正。

主量元素和微量元素分析测试在中国地质调查局西安矿产资源调查中心完成,主量元素采用 X 荧光光谱仪进行分析,稀土和微量元素采用等离子质谱仪进行分析,测试结果见表 1。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年分析

样品的锆石颗粒的 CL 图像 (图 3) 显示所选的锆石为透明的自形晶体,为无色透明或浅黄色,大部分锆石结晶较好,短柱状晶形,阴极发光电子图像特征均显示出典型的岩浆结晶韵律环带结构。

本次所选锆石样品 25 颗,均为有效样品,黑云母花岗闪长岩锆石 U-Pb 分析测试结果见表 2,锆石 Th 含量为 $34.81 \times 10^{-6} \sim 129.66 \times 10^{-6}$, U 含量为 $52.88 \times 10^{-6} \sim 147.36 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.55~0.97,均大于 0.4,说明锆石为岩浆成因 (吴元保等, 2004)。锆石微量元素测试结果见表 3,其显示出重稀土富集,相对亏损轻稀土元素的特征,显示典型的岩浆锆石成因特征

表 1 罗城黑云母花岗闪长岩主量元素(%）、微量元素(10^{-6})、稀土元素(10^{-6})分析结果表Tab. 1 Analysis results of major elements (%), trace elements (10^{-6}) and rare earth elements (10^{-6}) in Luocheng biotite granodiorite

样品编号	LCYT03	LCYT04	LCYT05	LCYT06
SiO ₂	59.84	58.75	58.52	59.09
Al ₂ O ₃	16.91	17.25	17.28	17.28
Fe ₂ O ₃	7.13	7.82	7.55	7.61
CaO	6.33	6.70	6.93	6.68
MgO	3.13	3.38	3.53	3.34
K ₂ O	1.87	1.49	1.49	1.54
Na ₂ O	2.52	2.60	2.55	2.60
P ₂ O ₅	0.13	0.15	0.15	0.15
TiO ₂	0.68	0.74	0.77	0.75
MnO	0.13	0.14	0.14	0.14
LOI	1.03	0.74	0.85	0.60
总和	99.70	99.76	99.75	99.79
K ₂ O+Na ₂ O	4.40	4.09	4.04	4.15
K ₂ O/Na ₂ O	0.74	0.57	0.59	0.59
δ	1.15	1.06	1.05	1.07
A/NK	2.74	2.93	2.98	2.9
A/CNK	0.97	0.97	0.96	0.97
Rb	61.1	49.2	40.6	46.9
Th	3.37	4.58	5.70	8.46
U	0.79	0.72	0.74	0.75
Nb	4.48	4.76	4.64	4.64
Sr	376	429	413	403
Zr	84.3	112	88.6	118
Hf	2.34	2.79	2.23	2.97
F	454	320	663	360
Sn	< 1.80	< 1.80	< 1.80	< 1.80
Cr	12.9	17.6	14.1	14.1
Li	16.8	18.3	17.3	17.4
Be	0.76	0.87	0.86	0.79
V	166	186	180	174
Co	15.3	16.2	15.6	15.3
Ni	8.36	10.9	11.2	10.4
Ga	16.6	17.7	16.3	16.4
Cs	2.52	2.92	2.69	3.15
Ta	0.33	0.35	0.34	0.35
W	2.30	1.91	1.81	1.80
Bi	0.073	0.070	< 0.050	0.057
La	12.0	14.3	12.5	12.5
Ce	27.1	28.9	25.5	25.7
Pr	3.60	3.59	3.32	3.21
Nd	16.4	15.3	14.6	14.1
Sm	3.91	3.37	3.28	3.14
Eu	1.05	1.07	1.05	1.03
Gd	4.14	3.54	3.49	3.41
Tb	0.66	0.55	0.54	0.52
Dy	4.04	3.28	3.24	3.15
Ho	0.83	0.68	0.67	0.65
Er	2.54	2.03	2.02	1.95
Tm	0.36	0.29	0.29	0.28
Yb	2.33	1.88	1.87	1.84
Lu	0.36	0.30	0.30	0.29
Y	21.3	17.2	16.9	16.4
Σ REE	79.32	79.08	72.67	71.77
LREE	64.06	66.53	60.25	59.68
HREE	15.26	12.55	12.42	12.09
LREE/HREE	4.20	5.30	4.85	4.94
(La/Yb) _N	3.69	5.46	4.79	4.87
δ Eu	0.80	0.95	0.95	0.96
δ Ce	1.01	0.99	0.97	0.99

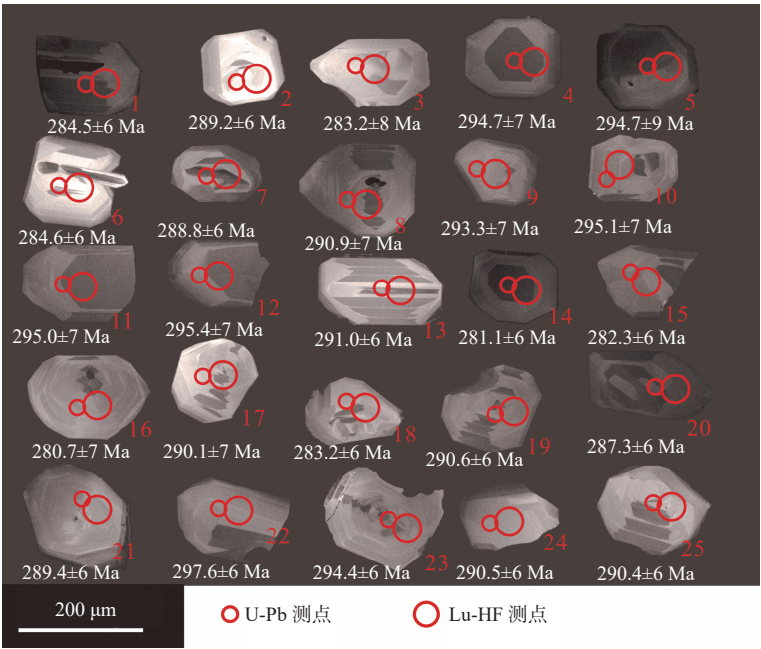


图3 锆石样品测点 CL 照片

Fig. 3 CL photograph of the zircon sample

表 2 罗城花岗闪长岩(LCYT01)锆石 LA-ICP-MS 测年结果

Tab. 2 Zircon LA-ICP-MS dating results of Luocheng granodiorite (LCYT01)

测点号	含量 (10 ⁻⁶)			Th/U	同位素比值								同位素年龄							
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	±1σ
LCYT001	15.96	79.28	81.67	0.97	0.051 53	0.004 23	0.320 79	0.025 51	0.045 11	0.001 02	0.014 52	0.000 48	264.4	177.81	282.5	19.61	284.5	6.28	291.3	9.56
LCYT002	14.25	47.28	72.22	0.65	0.052 02	0.004 6	0.329 39	0.028 27	0.045 89	0.001 08	0.012 69	0.000 63	286.1	189.7	289.1	21.59	289.2	6.68	255	12.64
LCYT003	12.04	34.81	63.55	0.55	0.052 4	0.006 97	0.324 63	0.042 27	0.044 9	0.001 34	0.013 75	0.000 88	302.7	277.82	285.5	32.4	283.2	8.26	276.1	17.48
LCYT004	19.92	93.99	98.06	0.96	0.049 23	0.004 98	0.317 72	0.031 38	0.046 78	0.001 14	0.014 32	0.000 59	158.7	220.85	280.1	24.18	294.7	7.05	287.5	11.7
LCYT005	11.37	41.91	57.97	0.72	0.051 7	0.007 62	0.333 65	0.048 17	0.046 78	0.001 52	0.016 11	0.000 95	272.2	306.78	292.4	36.67	294.7	9.39	323	18.95
LCYT006	16.79	80.92	85.36	0.95	0.050 21	0.004 38	0.312 61	0.026 51	0.045 13	0.001 03	0.013 45	0.000 49	204.9	190.68	276.2	20.51	284.6	6.35	270	9.73
LCYT007	27.09	129.66	147.36	0.88	0.054 12	0.003 56	0.342	0.021 6	0.045 82	0.000 96	0.013 84	0.000 42	375.8	141.54	298.7	16.34	288.8	5.93	277.8	8.4
LCYT008	12.51	45.55	65.96	0.69	0.050 29	0.004 3	0.320 15	0.026 6	0.046 16	0.001 06	0.015 35	0.000 62	208.3	187.16	282	20.46	290.9	6.51	307.8	12.31
LCYT009	13.69	45.68	72.34	0.63	0.051 53	0.004 44	0.330 81	0.027 63	0.046 56	0.001 09	0.015 19	0.000 68	264.4	186.14	290.2	21.08	293.3	6.73	304.7	13.59
LCYT010	12.68	46.02	66.65	0.69	0.051 15	0.004 72	0.330 38	0.029 7	0.046 85	0.001 11	0.014 57	0.000 63	247.4	199.46	289.9	22.67	295.1	6.83	292.5	12.53
LCYT011	13.09	49.92	68.97	0.72	0.047 92	0.005 63	0.309 37	0.035 63	0.046 82	0.001 22	0.014 73	0.000 87	94.2	257.92	273.7	27.63	295	7.49	295.6	17.3
LCYT012	12.53	47.8	65.53	0.73	0.052 1	0.004 82	0.336 83	0.030 33	0.046 89	0.001 12	0.016 06	0.000 63	289.7	198	294.8	23.04	295.4	6.87	322	12.57
LCYT013	18.31	92.71	98.11	0.94	0.051 78	0.003 9	0.329 56	0.023 99	0.046 18	0.001	0.013 62	0.000 44	275.6	163.56	289.2	18.32	291	6.19	273.3	8.78
LCYT014	19	93.38	105.35	0.89	0.053 29	0.003 98	0.327 3	0.023 58	0.044 57	0.000 99	0.014 33	0.000 46	340.9	160.32	287.5	18.04	281.1	6.09	287.6	9.21
LCYT015	15.16	51.53	80.72	0.64	0.049 48	0.004 12	0.305 21	0.024 72	0.044 76	0.000 98	0.014 24	0.000 55	170.8	183.56	270.5	19.23	282.3	6.06	285.7	11.06
LCYT016	14.01	55.43	76.33	0.73	0.050 3	0.005 37	0.308 48	0.032 08	0.044 51	0.001 18	0.012 86	0.000 65	209	229.96	273	24.9	280.7	7.27	258.2	12.91
LCYT017	11.3	45.88	60.72	0.76	0.052 39	0.004 99	0.332 31	0.030 79	0.046 04	0.001 15	0.012 88	0.000 6	302.4	203.45	291.3	23.47	290.1	7.1	258.6	11.9
LCYT018	16.38	73.42	88.24	0.83	0.053 21	0.003 7	0.329 2	0.022 01	0.044 9	0.000 96	0.014 09	0.000 44	337.7	149.52	289	16.81	283.2	5.92	282.7	8.81
LCYT019	15.81	76.58	80.92	0.95	0.051 66	0.003 78	0.328 13	0.023 17	0.046 1	0.000 99	0.014 66	0.000 44	270.4	159.18	288.1	17.72	290.6	6.07	294.2	8.75
LCYT020	13.2	53.42	68.41	0.78	0.050 23	0.004 23	0.315 34	0.025 82	0.045 57	0.001 03	0.015 1	0.000 54	205.7	184.61	278.3	19.93	287.3	6.36	302.9	10.68
LCYT021	10.77	36.85	52.88	0.70	0.050 95	0.004 4	0.322 25	0.027 02	0.045 92	0.001 05	0.013 67	0.000 64	238.6	187.4	283.6	20.75	289.4	6.46	274.3	12.67
LCYT022	13.95	47.61	68.78	0.69	0.052 83	0.003 88	0.343 72	0.024 36	0.047 24	0.001 02	0.013 89	0.000 55	321.3	157.94	300	18.41	297.6	6.25	278.8	10.94
LCYT023	23.03	103.73	117.27	0.88	0.052 35	0.003 13	0.336 94	0.019 26	0.046 73	0.000 94	0.014 21	0.000 41	300.6	130.55	294.9	14.63	294.4	5.77	285.2	8.1
LCYT024	16.81	56.88	85.69	0.66	0.053 87	0.003 47	0.341 95	0.021 13	0.046 09	0.000 95	0.013 37	0.000 48	365.6	138.52	298.6	15.99	290.5	5.83	268.4	9.65
LCYT025	14.8	67.05	76.38	0.88	0.052 03	0.003 84	0.330 11	0.023 59	0.046 08	0.000 99	0.014 19	0.000 47	286.8	160.34	289.7	18	290.4	6.11	284.8	9.33

表 3 罗城花岗闪长岩锆石分析点位微量元素(10^{-6})测试结果
Tab. 3 Test results of trace elements (10^{-6}) at zircon analysis points of Luo Cheng granodiorite

测点号	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta
LCYT001	1.10	0.06	8.23	0.05	0.23	0.49	1.28	27.74	0.78	107.27	40.27	181.12	35.88	339.17	66.63	0.28
LCYT002	0.49	0.04	6.69	0.03	2.07	3.33	0.40	11.13	8.82	67.14	26.56	126.02	27.32	290.78	57.98	0.24
LCYT003	0.61	0.00	6.26	0.02	0.49	2.64	0.29	7.43	4.65	45.16	17.35	87.13	19.02	192.36	38.24	0.27
LCYT004	0.63	0.06	9.25	0.08	0.44	0.69	1.15	25.90	3.00	112.88	44.64	196.44	39.56	377.09	71.61	0.26
LCYT005	0.55	0.00	6.42	0.03	1.79	4.98	0.36	8.45	9.99	40.51	19.27	87.53	19.76	189.52	37.30	0.23
LCYT006	0.52	0.01	9.03	0.05	0.63	1.34	0.91	24.92	3.67	102.58	38.80	175.98	35.30	323.64	65.73	0.28
LCYT007	0.46	0.02	17.04	0.11	1.55	2.65	0.85	24.04	6.96	113.49	45.17	206.58	43.34	418.84	82.25	0.41
LCYT008	1.37	0.00	7.31	0.03	1.49	3.08	0.46	10.50	8.69	50.85	20.86	97.32	21.63	218.50	42.57	0.30
LCYT009	0.53	0.04	7.76	0.02	0.67	1.58	0.24	7.99	4.06	43.08	18.56	85.81	19.58	193.52	36.74	0.31
LCYT010	0.65	0.00	7.39	0.03	0.40	1.28	0.24	11.38	3.43	52.67	20.97	98.21	22.28	213.94	42.28	0.26
LCYT011	0.67	0.01	7.65	0.05	0.44	2.14	0.43	11.65	4.08	54.24	22.14	101.02	21.59	221.82	41.65	0.21
LCYT012	0.58	0.24	7.21	0.07	0.73	1.88	0.48	9.62	4.43	51.70	20.95	100.70	22.19	222.33	43.83	0.39
LCYT013	3.01	0.01	9.21	0.08	1.56	2.82	0.95	24.93	3.94	113.56	45.37	198.15	41.36	399.32	71.97	0.38
LCYT014	0.66	0.01	9.65	0.07	1.79	3.63	1.15	28.87	9.60	117.65	44.48	198.85	41.00	392.05	76.11	0.34
LCYT015	0.58	0.00	8.44	0.02	2.16	4.68	0.33	10.50	9.83	52.88	20.95	100.98	22.47	230.32	44.42	0.31
LCYT016	0.74	0.00	7.73	0.04	0.49	1.29	0.40	12.46	4.08	61.43	26.20	120.97	26.57	261.96	52.64	0.38
LCYT017	0.73	0.00	6.93	0.02	0.87	2.13	0.43	12.06	5.04	54.07	23.41	106.05	23.33	232.88	44.25	0.33
LCYT018	0.84	0.01	8.09	0.06	0.57	1.82	0.83	20.89	4.58	92.58	36.57	172.39	35.31	347.52	67.40	0.29
LCYT019	0.61	0.00	8.04	0.06	1.53	3.32	0.97	26.28	7.25	103.33	41.09	175.93	36.48	349.56	66.29	0.23
LCYT020	0.47	0.00	7.31	0.02	1.72	5.06	0.39	14.22	8.78	63.23	24.83	115.49	25.21	238.91	45.30	0.22
LCYT021	0.57	0.01	5.70	0.02	0.69	1.87	0.53	10.94	5.15	53.16	21.38	104.62	22.91	221.56	45.69	0.30
LCYT022	0.53	0.04	6.60	0.03	0.27	1.73	0.46	12.33	3.89	67.24	25.79	122.86	27.12	273.00	52.93	0.28
LCYT023	0.70	0.04	9.56	0.09	0.57	1.92	1.18	27.41	5.00	122.96	49.00	227.37	46.39	456.07	89.13	0.38
LCYT024	1.14	0.04	8.63	0.02	1.85	4.19	0.28	9.30	10.49	48.68	20.06	95.23	20.74	214.10	41.88	0.34
LCYT025	1.12	0.02	7.63	0.07	1.41	2.91	1.04	22.23	4.01	93.47	36.23	160.65	34.00	327.88	65.05	0.25

(Hoskin, 2000)。锆石谐和图反映出锆石 U-Pb 年龄数据分布比较集中且谐和程度较好(图 4a),所有数据协和度均符合要求,证明数据均有效。通过数据分析得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(289\pm3)\text{Ma}$, ($\text{MSWD}=0.57$),代表岩浆结晶年龄(图 4b)。

4.2 锆石 Hf 同位素特征

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的基础上,对黑云母花岗闪长岩样品 25 颗锆石测点进行了锆石微区 Hf 同位素测定。测点的数据分析结果(表 4)。 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 $0.012\ 222\ 351\sim0.042\ 050\ 552$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 $0.000\ 424\ 71\sim0.001\ 378\ 472$, 均小于 0.002, 说明锆石在形成后具有很少的放射成因 Hf 的积累。因此, 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值可能代表该锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$

值(吴福元等, 2007), $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 $0.282\ 726\ 048\sim0.282\ 787\ 588$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值均为正值, 介于 $+4.37\sim+6.88$, 平均为 $+5.6$, 通过锆石 Hf 同位素 $\epsilon\text{Hf}(t)$ -U-Pb 年龄 $t(\text{Ma})$ 图解(图 5a), 测点均落在球粒陨石-亏损地幔之间, 反映其源区为年轻的幔源组分或新生地壳, Hf 同位素一阶段模式年龄 $T_{(\text{DM1})}$ 分布范围为 $615.4\sim703.0\ \text{Ma}$, 平均值为 $660.5\ \text{Ma}$, 地壳模式年龄 $T_{(\text{DMC})}$ 分布范围为 $808.6\sim952.5\ \text{Ma}$, 平均值为 $882.8\ \text{Ma}$, 地壳模式年龄 $T_{(\text{DMC})}$ 较集中(图 5b)。

4.3 主量元素特征

合黎山地区罗城黑云母花岗闪长岩的主量元素分析结果见表 1, 其 SiO_2 含量介于 $58.52\%\sim59.84\%$, Al_2O_3 含量介于 $16.91\%\sim17.28\%$ 。全碱含量 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$

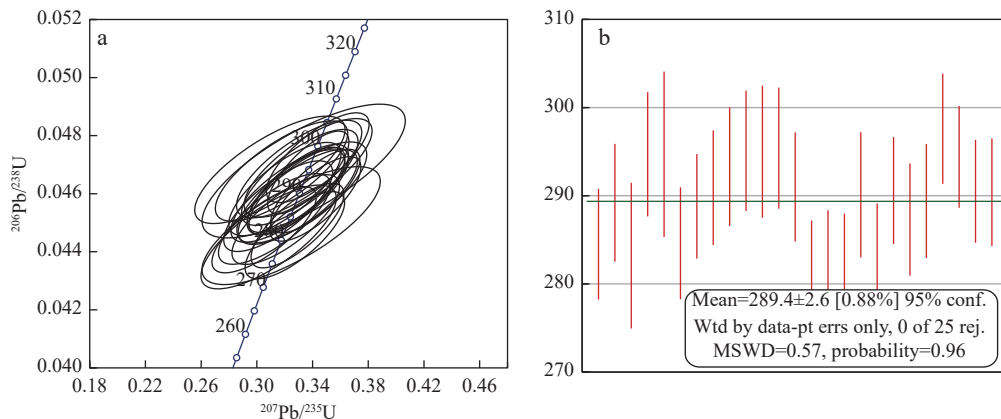
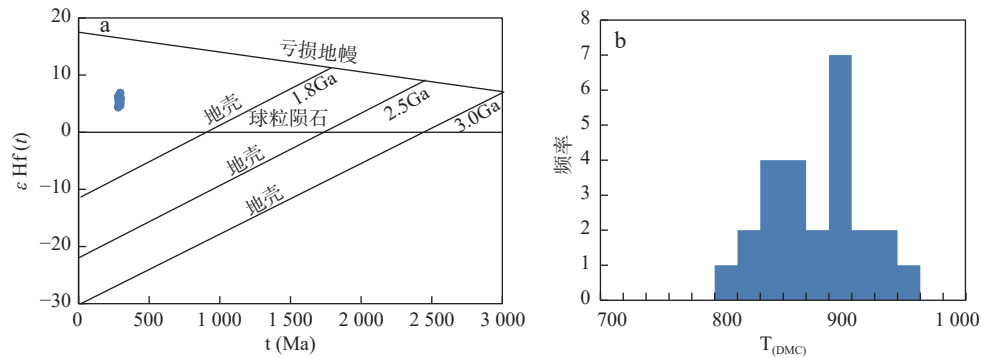


图4 锆石样品 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb Concord diagram of zircon samples

图5 罗城黑云母花岗闪长岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t (Ma) 图解(a) (据李良等, 2018) 和地壳模式年龄 $T_{(\text{DMC})}$ 统计直方图(b)Fig. 5 (a) Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t (Ma) diagram (According to LI Liang et al., 2018) and (b) crustal model age $T_{(\text{DMC})}$ statistical histogram (b) of Luo Cheng biotite granodiorite

介于 4.04%~4.40%, 相对富碱, Na_2O 含量介于 2.52%~2.60%, K_2O 含量介于 1.49%~1.87%, 富钠贫钾。里特曼指数 δ 介于 1.05~1.15。根据 CIPW 标准矿物计算 (Le Maitre, 1979), 石英 (Qtz) 含量介于 18.97%~20.69%, 碱性长石 (A) 含量介于 11.6%~14.66%, 斜长石 (Pl) 含量介于 47.86%~50.76%, 在 Q-A-P 图解中 (图 6a), 处在花岗闪长岩区域中。 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$) 图解 (图 6b) 反应岩石属于钙性系列。 SiO_2 - K_2O 图解 (图 6c) 反映岩石主体属于钙碱性系列。铝饱和指数 A/CNK 比较集中, 介于 0.96~0.97, A/NK 介于 2.74~2.98, 在 A/CNK-A/NK 图解中 (图 6d), 处在准铝质范围内。

4.4 微量元素特征

合黎山地区罗城黑云母花岗闪长岩的稀土元素分析结果见表 1, 其稀土元素总量 ΣREE 在 71.77×10^{-6} ~ 79.32×10^{-6} 之间, 平均为 75.71×10^{-6} 。LREE/HREE 值在 4.20~5.30 之间, 平均为 4.82, 相对富集轻稀土,

亏损重稀土。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 3.69~5.46 之间, 平均为 4.70, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图 (图 4a) 中显示稀土元素为右倾型配分模式。 δEu 值在 0.80~0.96 之间, 平均值为 0.91, Eu 具轻度负异常, 说明在岩浆演化过程中有少量的斜长石分离结晶作用。

合黎山地区罗城黑云母花岗闪长岩的微量元素分析结果见表 1, 在微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 7b) 上可见, 岩石均相对富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。

5 讨论

5.1 岩体成岩时代及岩石成因

合黎山地区罗城岩体锆石自形程度好, 具有典型的岩浆结晶韵律环带结构 (图 5), 且 Th/U 值均大于 0.4, 为典型的岩浆锆石 (王新雨等, 2023; 李平等, 2024), 其锆石数据谐和度较高, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年

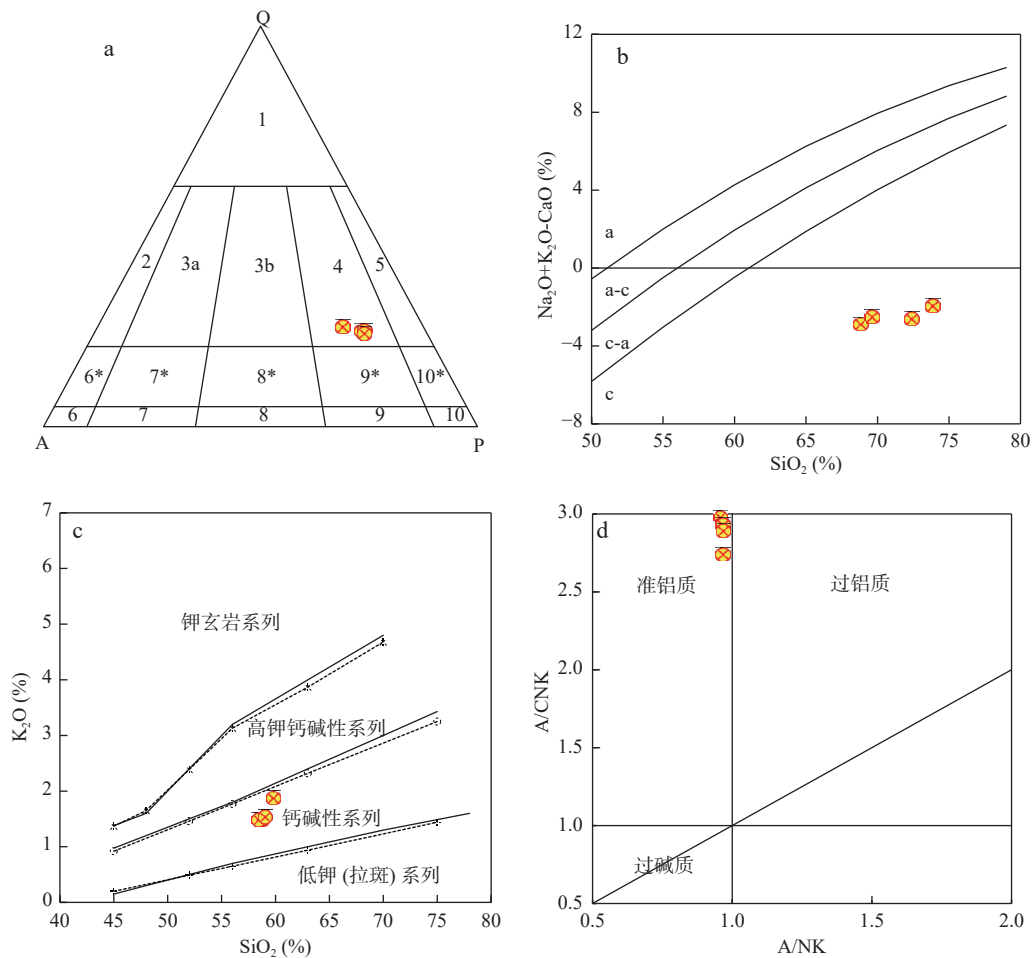


图6 罗城黑云母花岗闪长岩 Q-A-P 图解(a)(据 [Streckeisen, 1976](#))、 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$) 图解(b)(据 [Peccerillo et al., 1976](#))、 SiO_2 - K_2O 图解(c)(据 [Peccerillo et al., 1976](#))及 A/NK-A/CNK 图解(d)(据 [Maniar et al., 1989](#))

Fig. 6 (a) Q-A-P diagram of Luocheng biotite granodiorite, (b) SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$) diagram, (c) SiO_2 - K_2O diagram and (d) A/NK-A/CNK diagrams

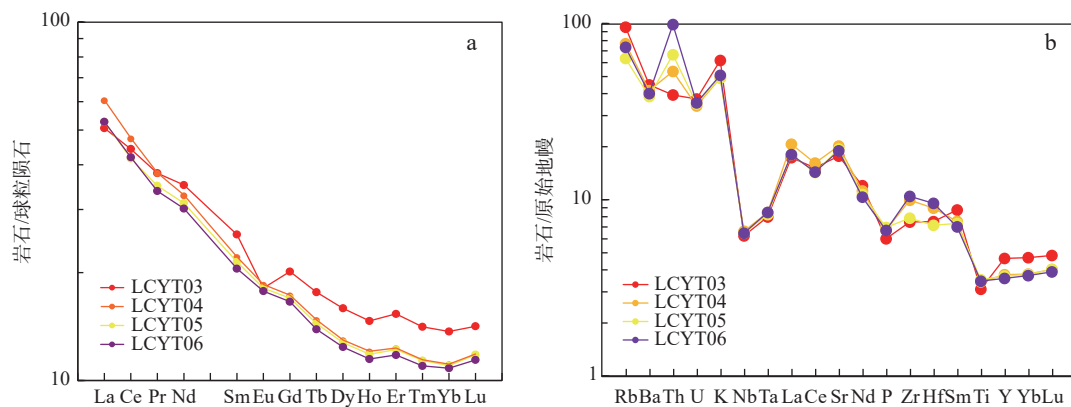


图7 罗城黑云母花岗闪长岩的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)(据 [Taylor et al., 1985](#))和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(据 [Sun et al., 1989](#))

Fig. 7 (a) Normalized distribution curve of rare earth element chondrites and (b) Primitive mantle-normalized trace element diagrams of Luocheng biotite granodiorite

龄为 (289 ± 3) Ma, 可代表岩浆结晶年龄, 因此, 合黎山地区罗城岩体形成于早二叠世。

合黎山地区罗城花岗闪长岩 Ga 含量为 $16.3 \times 10^{-6} \sim 17.7 \times 10^{-6}$, Al_2O_3 含量为 16.91%~17.28%, 10000Ga/Al 值为 1.78~1.93, 平均为 1.84, 小于 A 型花岗岩下限 2.6 (Whalen et al., 1987), 在 Zr-10000Ga/Al、Ce-10000Ga/Al、Y-10000Ga/Al 图解(图 8b、图 8c、图 8d)中, 罗城岩体均投影在 I & S 花岗岩区域, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图 8a)

中, 罗城岩体均处于 I 型花岗岩区域。根据岩石主量元素特征可知, 罗城花岗闪长岩具有钙碱性、准铝质特征, 其 A/CNK 比较集中, 介于 0.96~0.97, 均小于 1.1, 与 I 型花岗岩一致(Chappell et al., 1992; 李宏卫等, 2021), 且 P_2O_5 含量与 SiO_2 含量存在负线性关系, 与 I 型花岗岩演化趋势一致(Wolf et al., 1994)。综合判断分析, 罗城花岗闪长岩属于结晶分异 I 型花岗岩。

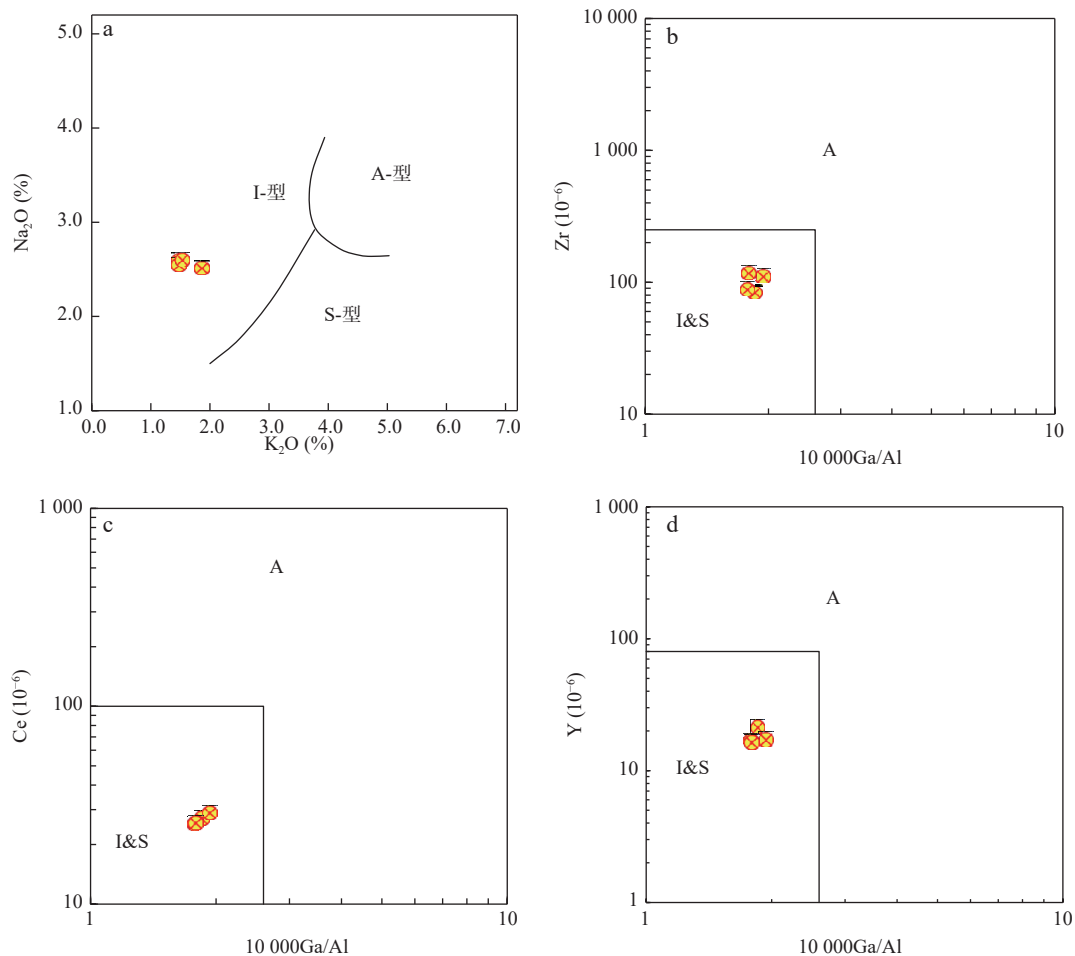


图8 罗城黑云母花岗闪长岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解(a)及 Zr、Ce、Y-10000Ga 图解(b、c、d)(据 Whalen et al., 1987)

Fig. 8 (a) $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ and (b, c, d) Zr, Ce, Y-10000 Ga diagram of Luo Cheng biotite granodiorite

5.2 岩浆起源及演化特征

I 型花岗岩主要来源于板块边缘陆壳下部, 可能与地壳岩石的部分熔融(徐克勤等, 1982)、交代岩石圈地幔部分熔融(Jiang et al., 2006)等有关, 罗城黑云母花岗闪长岩属于钙碱性系列, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 指示岩体具有大陆地壳物质的参与, 岩石 $\text{Nb}/\text{Ta}=13.25 \sim 13.65$, 平均值为 13.52, 接近大陆地壳

Nb/Ta 值($=10 \sim 14$)。在判断源岩的 C/MF-A/MF 图解(图 9a)中, 显示岩体源岩可能为基性岩的部分熔融, 岩石 δEu 值具轻度负异常, 在 0.80~0.96 之间, 平均值为 0.91, 说明在岩浆演化过程中有少量的斜长石分离结晶作用, 在 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解中(图 9b), 样品投点均落在了壳源与壳幔混合源花岗岩区域, La/Ta 值为 35.71~40.86, 大于起源于岩石圈地幔或受其混染岩浆 La/Ta 值的下限 25, 指示其为幔源或者壳幔混合源

表 4 黑云母花岗岩闪长岩锆石 Hf 同位素分析结果
Tab. 4 Zircon Hf isotope analysis results of biotite granodiorite

分析点	t(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	Hf _i	εHf (t)	εHf (0)	±1σ	T (DM1)	T (DM2)	±1σ	f ₁ Hf
LCYT01-01	284.5	0.018 558 653	0.000 625 497	0.282 772 262	0.000 019 415 0	0.282 769	6.141 62	0.079 994 272	0.679 525	634.4	846.8	0.066 73	-0.958 3
LCYT01-02	289.2	0.021 350 813	0.000 729 88	0.282 742 229	0.000 017 334 3	0.282 738	5.160 50	-0.982 120 012	0.606 701	676.8	910.5	0.065 471	-0.951 34
LCYT01-03	283.2	0.018 541 903	0.000 633 2	0.282 761 526	0.000 016 217 7	0.282 758	5.732 14	-0.299 686 693	0.567 62	649.0	871.0	0.062 774	-0.957 79
LCYT01-04	294.7	0.022 088 228	0.000 738 473	0.282 787 588	0.000 017 408 9	0.282 784	6.882 54	0.621 999 168	0.609 311	615.4	808.6	0.063 449	-0.950 77
LCYT01-05	294.7	0.016 473 205	0.000 610 408	0.282 734 375	0.000 017 810 1	0.282 731	5.024 45	-1.259 864 349	0.623 354	685.4	922.9	0.066 228	-0.959 31
LCYT01-06	284.6	0.030 878 08	0.001 030 04	0.282 748 701	0.000 016 938 0	0.282 743	5.233 86	-0.753 226 632	0.592 83	673.2	902.5	0.065 308	-0.931 133
LCYT01-07	288.8	0.019 725 731	0.000 669 661	0.282 759 209	0.000 016 640 9	0.282 756	5.764 27	-0.381 620 593	0.582 432	652.8	873.1	0.063 558	-0.955 36
LCYT01-08	290.9	0.025 750 031	0.000 867 335	0.282 742 988	0.000 018 067 8	0.282 738	5.197 57	-0.955 258 813	0.632 374	678.1	909.3	0.066 791	-0.942 18
LCYT01-09	293.3	0.021 818 077	0.000 740 69	0.282 752 659	0.000 017 018 8	0.282 749	5.615 88	-0.613 269 93	0.595 659	662.8	885.4	0.064 56	-0.950 62
LCYT01-10	295.1	0.031 810 315	0.001 072 333	0.282 760 072	0.000 018 527 3	0.282 754	5.852 24	-0.351 094 86	0.648 455	658.3	872.0	0.067 113	-0.928 51
LCYT01-11	295	0.032 320 695	0.001 060 83	0.282 770 029	0.000 018 758 8	0.282 764	6.204 71	0.001 027 859	0.656 558	644.5	850.3	0.066 935	-0.929 28
LCYT01-12	295.4	0.025 753 941	0.000 840 72	0.282 744 619	0.000 019 505 6	0.282 74	5.357 10	-0.897 570 925	0.682 698	675.5	902.8	0.068 675	-0.943 95
LCYT01-13	291	0.042 050 552	0.001 378 472	0.282 744 602	0.000 018 835 1	0.282 737	5.158 40	-0.898 174 811	0.659 227	684.9	911.5	0.069 048	-0.908 1
LCYT01-14	281.1	0.025 917 388	0.000 895 112	0.282 777 258	0.000 017 322 9	0.282 773	6.194 73	0.256 671 065	0.606 302	631.9	840.9	0.064 172	-0.940 33
LCYT01-15	282.3	0.012 222 351	0.000 424 71	0.282 730 661	0.000 018 589 3	0.282 728	4.659 46	-1.391 186 427	0.650 625	687.1	936.4	0.067 05	-0.971 69
LCYT01-16	280.7	0.026 071 795	0.000 893 78	0.282 726 048	0.000 018 777 7	0.282 721	4.374 30	-1.554 327 3	0.657 22	701.7	952.5	0.068 661	-0.940 41
LCYT01-17	290.1	0.026 377 494	0.000 892 334	0.282 753 361	0.000 017 767 1	0.282 749	5.542 65	-0.588 435 111	0.621 848	664.4	887.5	0.065 933	-0.940 51
LCYT01-18	283.2	0.024 916 918	0.000 880 457	0.282 778 938	0.000 020 321 2	0.282 774	6.301 97	0.316 093 287	0.711 244	629.4	835.9	0.068 288	-0.941 3
LCYT01-19	290.6	0.018 210 323	0.000 633 771	0.282 781 801	0.000 017 536 4	0.282 778	6.609 51	0.417 339 793	0.613 775	621.6	822.4	0.063 668	-0.957 75
LCYT01-20	287.3	0.018 020 85	0.000 615 423	0.282 772 775	0.000 017 057 2	0.282 769	6.222 22	0.098 119 936	0.597 003	633.5	843.9	0.063 38	-0.958 97
LCYT01-21	289.4	0.020 384 277	0.000 718 113	0.282 742 372	0.000 018 471 0	0.282 738	5.172 15	-0.977 040 9	0.646 485	676.4	909.9	0.067 032	-0.952 13
LCYT01-22	297.6	0.025 947 46	0.000 881 354	0.282 760 012	0.000 016 158 7	0.282 755	5.941 05	-0.353 235 735	0.565 556	655.2	868.5	0.063 322	-0.941 24
LCYT01-23	294.4	0.029 427 132	0.001 014 853	0.282 726 672	0.000 020 648 2	0.282 721	4.666 56	-1.532 286 504	0.722 688	703.0	944.4	0.071 574	-0.932 34
LCYT01-24	290.5	0.018 539 508	0.000 641 115	0.282 769 911	0.000 016 297 7	0.282 766	6.185 17	-0.003 162 189	0.570 421	637.8	848.5	0.062 508	-0.957 26
LCYT01-25	290.4	0.021 881 036	0.000 749 457	0.282 741 158	0.000 015 578 8	0.282 737	5.144 73	-1.019 970 646	0.545 259	678.6	912.3	0.063 102	-0.950 04

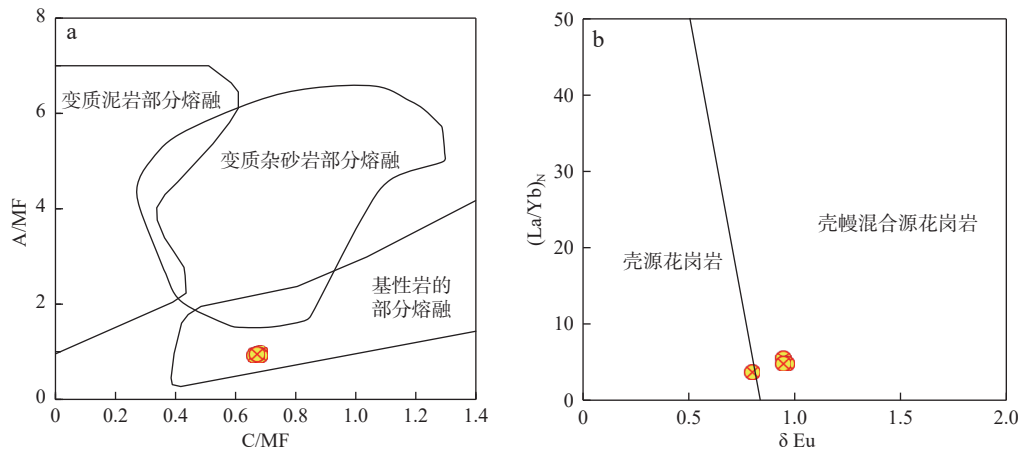


图9 罗城黑云母花岗闪长岩 C/MF-A/MF 图解(a)(据 Alther et al., 2000)及 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解(b)(据王钊飞等, 2019)

Fig. 9 (a) C/MF-A/MF diagram and (b) $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ diagram of Luocheng biotite granodiorite

(Lassiter et al., 1997)。

罗城黑云母花岗闪长岩锆石 Hf 二阶段模式年龄 $T_{(\text{DMC})}$ 分布范围为 808.6~952.5 Ma, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值介于 +4.37~+6.88, 通过锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ -U-Pb 年龄 $t(\text{Ma})$ 图解(图 7a), 测点均落在球粒陨石-亏损地幔之间, 反映其源区为年轻的幔源组分或具有新生地壳演化趋势(李金超等, 2021)。

在野外工作中, 在黑云母花岗闪长岩中发现暗色

微细粒包体发育(图 10), 包体形态可见椭圆状、圆状、透镜状以及不规则状, 大小差异较大, 包体常具淬冷边, 证明岩浆发生混合作用(王德滋等, 2008; 张建军等, 2012); $\text{Mg}^\#$ 值可以指示壳源岩浆作用是否有幔源物质的参与, 在地幔组分参与时, 才能导致熔体的 $\text{Mg}^\#$ 值大于 40(Rapp et al., 1995), 岩石 MgO 含量介于 3.13%~3.53%, $\text{Mg}^\#$ 值介于 0.64~0.66, 明显高于 40, 表明岩体源岩明显具幔源岩浆加入。



a. 椭圆状包体; b. 圆状包体; c. 透镜状包体; d. 不规则状包体

图10 罗城黑云母花岗闪长岩中暗色包体的形态

Fig. 10 Field photos showing morphology of Luocheng biotite granodiorite

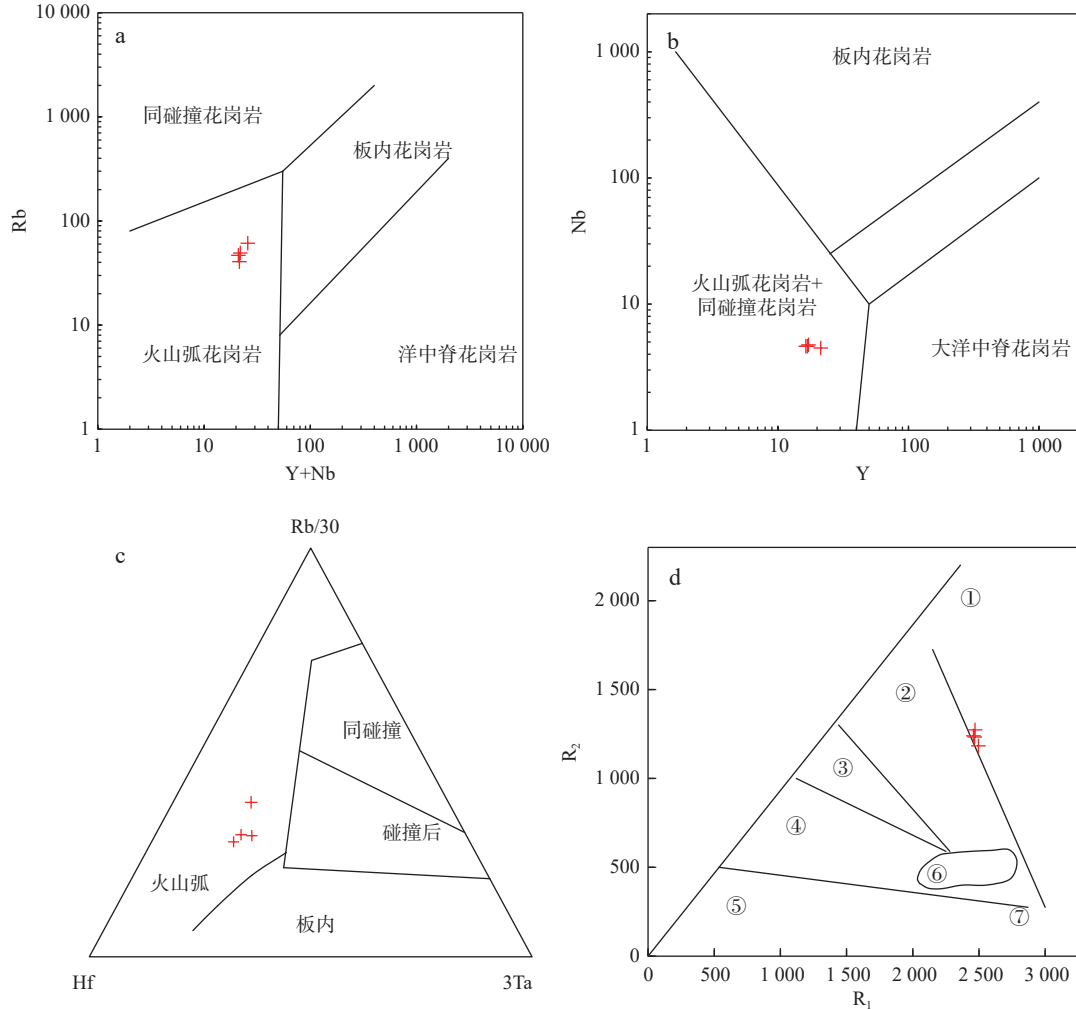
基于上述讨论, 罗城花岗闪长岩为壳源岩浆与幔源岩浆发生混合作用的产物, 这种作用是由于地壳深部存在强烈的地幔岩浆底侵作用, 导致新生地壳部分熔融并混入底侵的幔源物质。幔源的高温基性岩浆底侵, 为其提供了少量物质来源, 使岩石地球化学特征上既表现出壳源特征, 也表现出幔源物质的信息。

5.3 构造背景

罗城黑云母花岗闪长岩富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 具有典型的岛弧岩浆岩特征(王秉璋等, 2021), 其形成与大洋板片俯冲消减作用有关。通过对黑云母花岗闪长岩构造背景判别, 在 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$

(图 11a)、Nb-Y(图 11b)及 Hf-Rb/30-3Ta(图 11c)图解中,样品均落在火山弧花岗岩区域;在 R_1 - R_2 (图 11d)

图解中,样品落在地幔分异花岗岩与碰撞前花岗岩交界区域。



① 地幔分异花岗岩; ② 破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩; ③ 板块碰撞后隆起期花岗岩;
④ 晚造期花岗岩; ⑤ 非造山区花岗岩; ⑥ 同碰撞花岗岩; ⑦ 造山期花岗岩

图 11 花岗闪长岩构造背景判别 Rb-(Y+Nb)(a)、Nb-Y(b)(据 Pearce et al., 1984)、Hf-Rb/30-3Ta(c)(据 Harris et al., 1986)图解及 R_1 - R_2 (d)(据 Batchelor et al., 1985)图解

Fig. 11 Identification of granodiorite structural background (a) Rb-(Y+Nb), (b) Nb-Y, (c) Hf-Rb/30-3Ta and (d) R_1 - R_2 diagram

罗城岩体位于龙首山造山带的西南缘大陆边缘活动带和祁连裂谷的发育构成了龙首山成矿带特定的构造环境(王承花, 2010)。龙首山地区地壳演化自早古生代至中生代经历了活动-稳定-再活动-再稳定-又活动的发展阶段,其在晚古生代处于稳定的拉张环境(强利刚等, 2019),早古生代祁连造山带经历了北祁连洋向南俯冲,俯冲受阻,转为向北俯冲,引起北祁连岛弧与阿拉善陆块的碰撞,从而形成了一系列火山弧 I 型花岗岩(夏林圻等, 2003; 刘文恒等, 2019; 王增振等, 2020)。罗城二叠纪黑云母花岗闪长岩指示其形成环境为岩浆弧,且 R_1 - R_2 判别图解指示其形成环境为碰

撞前消减花岗岩环境,说明在晚古生代该区还存在一期俯冲碰撞活动,与前人对龙首山晚石炭世—早二叠世西山窑地区岩体处于弧后洋盆闭合过程,是古亚洲洋向南俯冲的结果(董国强等, 2022)相吻合,同时与前人认为的北山地区二叠纪时期仍发生的俯冲-增生造山过程延续可至三叠纪(宋东方等, 2018)存在相关性,而并非处于拉张稳定发展期(强利刚等, 2019)。

6 结论

(1)通过对罗城黑云母花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆

石 U-Pb 测年得出, 岩石锆石结晶年龄为 (289 ± 3) Ma, 属于早二叠世, 指示了区域上华力西期的强烈构造岩浆事件。

(2) 通过罗城黑云母花岗闪长岩岩相学、岩石地球化学及 Hf 同位素特征, 岩体富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Ba、Nb、Ta、P 等高场强元素, 属于准铝质钙碱性 I 型花岗岩, 是由新生地壳部分熔融并混入底侵幔源物质的产物, 指示了地壳深部强烈的地幔岩浆底侵作用。

(3) 罗城黑云母花岗闪长岩地球化学特征指示其形成于碰撞前的消减花岗岩环境, 结合龙首山地区构造演化历史, 表明该区在晚古生代还存在一期俯冲碰撞, 而并非一直处于拉张稳定发展期。

参考文献(References):

- 董国强, 余君鹏, 李通国, 等. 甘肃龙首山西山头窑地区中酸性岩体年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *新疆地质*, 2022, 40(3): 425–433.
- DONG Guoqiang, YU Junpeng, LI Tongguo, et al. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Intermediate Acid Magmatic Rocks in Shantouyao Area, West of Longshou Mountain, Gansu Province[J]. *Xinjiang Geology*, 2022, 40(3): 425–433.
- 甘肃省地质局. 高台幅、平川幅 1: 200000 区域地质测量报告[R]. 甘肃省地质局, 1974.
- 焦建刚, 汤中立, 闫海卿, 等. 甘肃高台-临泽地区 109-2 隐伏岩体岩石地球化学特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(2): 218–225.
- JIAO Jiangang, TANG Zhongli, YAN Haiqing, et al. Lithogeochemical characteristics of 109-2 hidden ultramafic intrusions at gao-tai-linze, gansu province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(2): 218–225.
- 刘文恒, 潘家永, 刘晓东, 等. 甘肃龙首山青山堡花岗岩成因及其构造意义: 元素地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd 同位素约束[J]. *矿物岩石*, 2019, 39(4): 26–40.
- LIU Wenheng, PAN Jiayong, LIU Xiaodong, et al. Petrogenesis and tectonic implication of qingshanbao pluton in longshou mountains, gansu: Constraints from elemental geochemistry, zircon U-Pb age and Sr-Nd isotopes[J]. *Mineral Petrol*, 2019, 39(4): 26–40.
- 李良, 孙丰月, 李碧乐, 等. 漠河地区黑云母花岗闪长岩地球化学、Hf 同位素特征及其成因[J]. *地球科学*, 2018, 43(2): 417–434.
- LI Liang, SUN Fengyue, LI Bile, et al. Geochemistry, Hf Isotopes and Petrogenesis of Biotite Granodiorites in the Mohe Area[J]. *Earth Science*, 2018, 43(2): 417–434.
- 李宏卫, 屈尚侠, 林小明, 等. 广东新丰新坪花岗闪长岩 (104 Ma) 地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究[J]. *中国地质*, 2021, 48(5): 1524–1539.
- LI Hongwei, QU Shangxia, LIN Xiaoming, et al. Petrogeochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope of Xinping granodiorite (104 Ma) in Xinfeng area, Guangdong Province[J]. *Geology in China*, 2021, 48(5): 1524–1539.
- 李金超, 国显正, 孔会磊, 等. 东昆仑浪麦滩地区 A 型花岗岩年代学地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(5): 1508–1522.
- LI Jinchao, GUO Xianzheng, KONG Huilei, et al. Geochronology, geochemical characteristics and geological significance of A-type granite from the Langmaitan area, East Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1508–1522.
- 李平, 朱涛, 吕鹏瑞, 等. 西天山早寒武世夏特辉长岩: 南天山洋早期俯冲的岩浆记录[J]. *西北地质*, 2024, 57(3): 44–58.
- LI Ping, ZHU Tao, LÜ Pengrui, et al. Early Cambrian Xiate Gabbro in Western Tianshan: Magmatic Records of Initial Subduction of the South Tianshan Ocean[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 44–58.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2400–2418.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Minwu, et al. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2400–2418.
- 牛宇奔, 刘文恒, 刘晓东, 等. 甘肃龙首山成矿带青山堡岩体地球化学特征及成因意义[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(34): 11–21.
- NIU Yuben, LIU Wenheng, LIU Xiaodong, et al. Geochemistry and petrogenesis of Qingshanbao pluton of Longshoushan metallogenic belt in Gansu[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(34): 11–21.
- 强利刚, 王刚, 邵东, 等. 龙首山成矿带地质构造演化研究[J]. *西部资源*, 2019, (5): 23–24.
- QIANG Ligang, WANG Gang, SHAO Dong, et al. Study on the geological structure evolution of the Longshou Mountain ore-forming belt[J]. *Western Resources*, 2019, (5): 23–24.
- 宋东方, 肖文交, 韩春明, 等. 北山中部增生造山过程: 构造变形和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学制约[J]. *岩石学报*, 2018, 34(7): 2087–2098.
- SONG Dongfang, XIAO Wenjiao, HAN Chunming, et al. Accretionary processes of the central segment of Beishan: Constraints from structural deformation and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(7): 2087–2098.
- 谭文娟, 杨合群, 张小平, 等. 祁连及邻区成矿区带的划分[J].

地质找矿论丛, 2012, 27(01): 9–15.

TAN Wenjuan, YANG Hequn, ZHANG Xiaoping, et al. Division of metallogenic belts in Qilian mountain and adjacent areas[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2012, 27(01): 9–15.

汤中立, 白云来. 华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统[J]. *地学前缘*, 1999, 6(2): 271–284.

TANG Zhongli, BAI Yunlai. Geotectonic framework and metallogenic system in the southwest margin of north China paleocontinent[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(2): 271–284.

王德滋, 谢磊. 岩浆混合作用: 来自岩石包体的证据[J]. *高校地质学报*, 2008, (1): 16–22.

WANG Dezi, XIE Lei. Magma Mingling: Evidence from Enclaves[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, (1): 16–22.

王新雨, 王书来, 吴锦荣, 等. 青海省牛苦头铅锌矿床成矿时代研究: 来自成矿岩体年代学和黄铁矿 Re–Os 地球化学证据[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 71–81.

WANG Xinyu, WANG Shulai, WU Jinrong, et al. Mineralization Age and Ore forming–Source of Niukutou Pb–Zn Deposit, Qinghai: Evidence from Geochronology of Ore–forming Rock Bodies and Re–Os Geochemistry of Pyrite[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 71–81.

王增振, 陈宣华, 邵兆刚, 等. 甘肃龙首山–合黎山晚志留世–早泥盆世花岗岩类的成因及其对阿拉善地块西南缘早古生代构造演化的约束[J]. *地质学报*, 2020, 94(8): 2243–2257.

WANG Zengzhen, CHEN Xuanhua, SHAO Zhaogang, et al. Petrogenesis of the Late Silurian–Early Devonian granites in the Longshoushan–Helishan area, Gansu Province, and its tectonic implications for the Early Paleozoic evolution of the southwestern Alxa Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(8): 2243–2257.

王钊飞, 隋清霖, 贺永康. 西昆仑沙子沟铜矿区花岗闪长岩年代学地球化学及 Hf 同位素特征[J]. *西北地质*, 2019, 52(3): 90–109.

WANG Zhaofei, SUI Qinglin, HE Yongkang. Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Com positions of the Granodiorite in the Shazigou Copper Deposit, Vest Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 90–109.

王秉璋, 潘彤, 任海东, 等. 东昆仑祁漫塔格寒武纪岛弧: 来自拉陵高里河地区玻安岩型高镁安山岩/闪长岩锆石 U–Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素证据[J]. *地学前缘 (中国地质大学 (北京); 北京大学)*, 2021, 28(1): 318–333.

WANG Bingzhang, PAN Tong, REN Haidong, et al. Cambrian Qimantagh island arc in the East Kunlun orogeny: Evidences from zircon U–Pb ages, litho geochemistry and Hf isotopes of high-

Mg andesite/diorite from the Lalinggaolihe area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 318–333.

王承花. 龙首山成矿带成矿规律及找矿方向[J]. *甘肃科技*, 2010, 26(10): 39–44.

WANG Chenghua. Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Longshou Mountain Metallogenic Belt[J]. *Gansu Science and Technology*, 2010, 26(10): 39–44.

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.

吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U–Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589–1604.

WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Study on the mineralogy of Zircon and its constraints on the interpretation of U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1604.

夏林圻, 徐学义, 夏祖春, 等. 天山石炭纪碰撞后裂谷火山作用[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 358.

XIA Linqi, XU Xueyi, XIA Zuchun, et al. Volcanism of rift valley after Carboniferous collision in Tianshan Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 358.

徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 等. 华南两个成因系列花岗岩类及其成矿特征[J]. *桂林工学院学报*, 1982, (1): 1–10.

XU Keqin, HU Shouxi, SU Mingzhi, et al. On the Two Genetic Series of Granites in South China and their Metallogenetic Characteristics[J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 1982, (1): 1–10.

袁洪林, 高山, 罗彦, 等. Lu–Hf 年代学研究—以大别榴辉岩为例[J]. *岩石学报*, 2007, 23(02): 233–239.

YUAN Honglin, GAO Shan, LUO Yan, et al. Study of Lu–Hf Geochronology: a case study of eclogite from DaBie UHP Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(02): 233–239.

张甲民, 赵如意, 王刚, 等. 甘肃龙首山菱岭铀矿区 A 型似斑状花岗岩地质特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学报*, 2017, (05): 121–131.

ZHANG Jiamin, ZHAO Ruyi, WANG Gang, et al. The Geological Characteristics and Significances of A-Type Porphyritic Granite in the Jiling Uranium Deposit in the Longshou Mountains, Gansu Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, (05): 121–131.

张建军, 王涛, 张招崇, 等. 华北地块北缘西段巴音诺尔公–狼山地区牙马图岩体的岩浆混合成因[J]. *地质论评*, 2012, 58(1): 53–66.

ZHANG Jianjun, WANG Tao, ZHANG Zhaochong, et al. Magma Mixing Origin of Yamatu Granite in Nuorgong–Langshan

- Area, Western Part of the Northern Margin of North China Craton: Petrological and Geochemical Evidences[J]. [Geological Review](#), 2012, 58(1): 53–66.
- 张照伟, 谭文娟, 杜辉, 等. 金川岩浆镍钴硫化物矿床深部找矿勘查技术研究[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 242–253.
- ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, DU Hui, et al. Study on Exploration Techniques of Deep Ore Prospecting in Jinchuan Magmatic Co–Ni Sulfide Deposit, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 242–253.
- Alther R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[R]. *Lithos*, 2000, 50(1): 51–73.
- Batchelor, R A, Bowden P. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters[J]. [Chemical Geology](#), 1985, 48(1–4): 43–55.
- Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt[J]. *Royal Society of Edinburgh Transaction*, 1992, 83: 1–26.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical Characteristics of Collision-zone Magmatism[J]. [Geological Society, London, Special Publications](#), 1986, 19(1): 67–81.
- Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18(4): 423–439.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, et al. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr–Nd–Pb–Hf isotopic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(3): 617–633.
- LASSITER J C, Depaolo D J. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints. In: Mahoney J, ed. *Large Igneous Provinces: Continental Oceanic and Planetary Flood Volcanism*. Geophysical Monograph 100 [M]. Washington DC: American Geophysical Union Press, 1997, 335–355.
- Le Maitre R W. A new generalised petrological mixing model[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 71(2): 133–137.
- Ludwig, K R. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geo-chronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geo-chronology Center Special Publication, Berkeley. 2003.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1989, 10(5): 635–643.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- 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.
- Rapp R P, Watson E B. Dehydration Melting of Melts at 8–32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust–Mantle Recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891–931.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42(1): 313–345.
- Streckeisen A L. Classification of the Common Igneous Rocks by Means of Their Chemical Composition: A Provisional Attempt[J]. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Monatshefte*, 1976, 1: 1–15.
- Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985, 1–312.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. [Contributions to Mineralogy and Petrology](#), 1987, 95: 407–419.
- Wolf M B, London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and mechanism[J]. [Geochimica et Cosmochimica Acta](#), 1994, 58: 4127–4145.