

吉林省西保安二叠纪 E-MORB 型基性岩岩石成因及其对古亚洲洋演化的启示

张天宇, 韩作振, 高丽华, 朱敏, 陈佳乐, 卢可心, 宋志刚

(山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:斜长角闪片岩是西保安岩组的主要岩石类型之一,为探讨其形成时代与构造背景,利用岩相学、岩石地球化学和锆石 U-Pb 年代学对其进行研究。结果表明,斜长角闪片岩主要矿物成分为角闪石和斜长石,具有低硅、钾,高镁、钙特征,其原岩为基性岩浆岩,具拉斑系列-钙碱性系列过渡特征,呈稀土总量偏低、轻微的轻稀土元素富集和平坦的重稀土配分模式,其 $(La/Yb)_N$ 值介于 2.15~2.40,微量元素无明显的 Nb-Ta 异常,与 E-MORB 相似。斜长角闪片岩样品中岩浆成因锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 +7.6~+14.1。岩石地球化学特征显示,明显富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素,并具有以下关键元素比值特征: Nb/Ta=13.6~16.0, Zr/Hf=37.5~38.8, La/Ta=10.4~11.7, La/Nb=0.74~0.81, Th/Sm=1.80~2.35, Th/Yb=2.41~2.80。上述特征共同表明,其岩浆来源于曾遭受俯冲沉积物熔体交代的亏损软流圈地幔源区。锆石 U-Pb 定年显示其结晶年龄为 274 ± 4 Ma,表明形成时代为早二叠世末期。综合区域地质资料,认为该 E-MORB 型基性岩形成于古亚洲洋板块低角度前进式俯冲或弧-陆碰撞、华北板块北缘东段地壳由减薄向增厚转变阶段,为局部伸展背景下的岩浆活动产物。

关键词:二叠纪;斜长角闪片岩;西保安岩组;华北板块北缘东段;古亚洲洋

中图分类号:P581

文献标志码:A

Petrogenesis of Permian E-MORB type mafic rocks in Xibao'an area, Jilin Province and its implications for evolution of Paleo-Asian Ocean

ZHANG Tianyu, HAN Zuozhen, GAO Lihua, ZHU Min, CHEN Jiale, LU Kexin, SONG Zhigang
(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Amphibolite schist is one of the main rock types in the Xibao'an rock formation. To investigate its formation age and tectonic setting, we conducted petrographic, whole-rock geochemical, and zircon U-Pb geochronological analyses. The results show that the amphibole-plagioclase schist is mainly composed of hornblende and plagioclase, with low Si and K contents and high Mg and Ca contents. Its protolith is basic magmatic rock, exhibiting transitional characteristics between tholeiitic and calc-alkaline series. The total rare earth element content is relatively low, with slight enrichment of light rare earth elements and a flat heavy rare earth element distribution pattern. The $(La/Yb)_N$ ratio ranges from 2.15 to 2.40, and the trace elements show no significant Nb-Ta anomalies, resembling E-MORB. The magmatic zircons in the amphibolite schist samples have $\epsilon_{Hf}(t)$ values ranging from +7.6 to +14.1. The whole-rock geochemical characteristics reveal significant enrichment in large-ion lithophile elements (e.g., Rb and Ba) and distinctive elemental ratios: Nb/Ta = 13.6~16.0, Zr/Hf = 37.5~38.8, La/Ta = 10.4~11.7, La/Nb = 0.74~0.81, Th/Sm = 1.80~2.35, and Th/Yb = 2.41~2.80. Collectively, these features indicate that the magma was derived from a depleted

收稿日期:2025-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(42302244);山东省自然科学基金项目(ZR2025MS549)

作者简介:张天宇(2000—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事岩石学和地球化学研究。

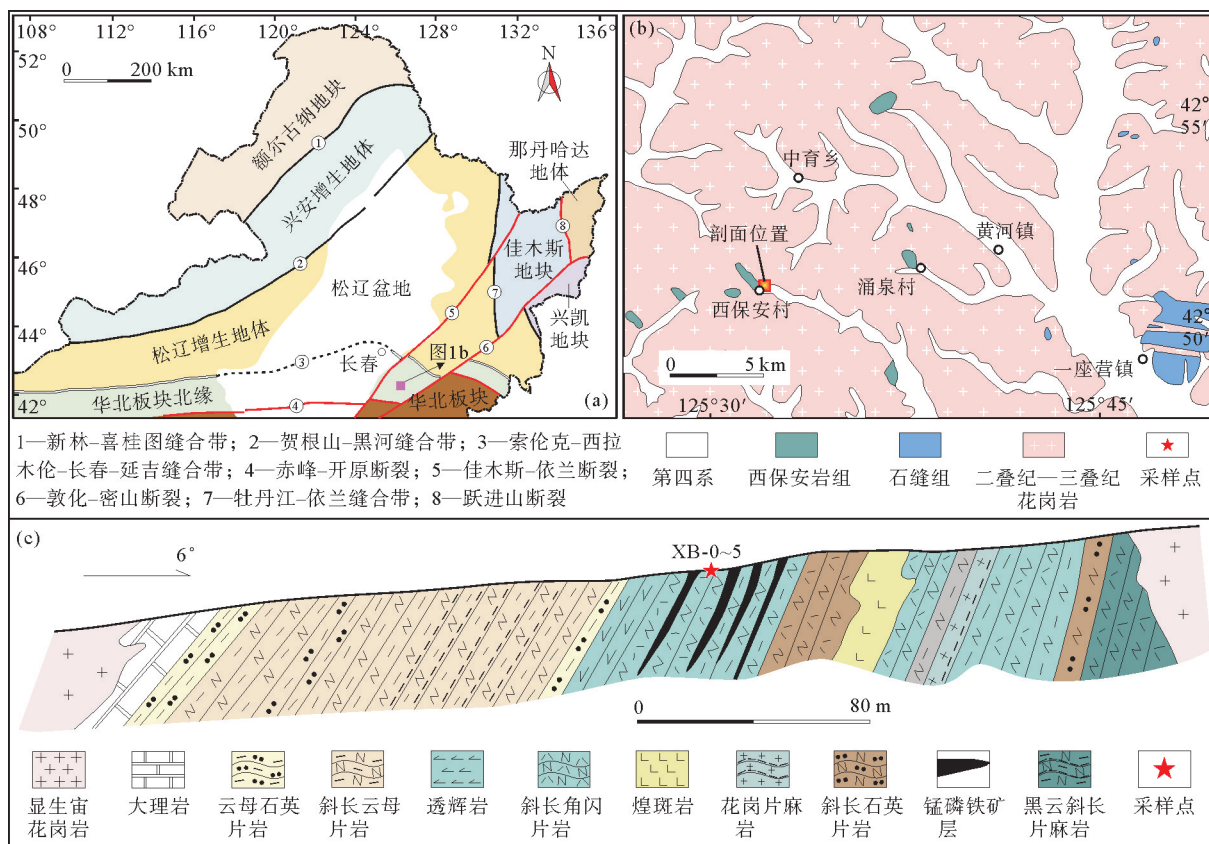
宋志刚(1988—),男,山东滨州人,副教授,博士,主要从事岩石学和地球化学研究,本文通信作者。

E-mail:zhgsong@foxmail.com

asthenospheric mantle source that had been metasomatized by melts from subducted sediments. Zircon U-Pb dating yields a crystallization age of 274 ± 4 Ma, suggesting that the rock formed during the late Early Permian. Integrated with regional geological data, it is proposed that this E-MORB-type basic rock was generated in a local extensional setting, associated with either low-angle progressive subduction of the Paleo-Asian oceanic plate or an arc-continent collision event during the transitional stage from crustal thinning to thickening in the eastern segment of the northern margin of the North China Craton.

Key words: Permian; amphibolite schist; Xibao'an rock formation; Eastern segment of the northern margin of the North China Block; Paleo-Asian Ocean

西保安地区位于华北板块北缘东段,是古亚洲洋构造域的重要组成部分。西保安岩组为一套变质火山-沉积岩系(图 1),因赋存沉积变质型铁锰矿产而受关注。其形成时代长期存在争议,早期多认为属前震旦纪,后期通过区域对比,又提出志留纪-泥盆纪、奥陶纪、寒武纪-奥陶纪或震旦纪等多种观点^[1-2]。此外,关于其构造背景也未形成统一认识,既有被动大陆边缘的解释,也有将其归为新元古代岩浆弧构造残片的观点^[3]。作为上地幔与下地壳部分熔融的直接产物,基性岩是连接地球深部与表层系统的关键地质载体,被视为揭示壳幔相互作用与深部动力学过程的“探针”,不仅可为重建板块构造历史提供关键依据,也具有重要的成矿指示与勘探意义^[4-5]。本研究在进行详细野外地质考察基础上,选取西保安岩组变质基性岩为研究对象,开展系统的岩石学、岩石化学、锆石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素分析,旨在为其形成时代提供新的年代学依据,并进一步分析其岩石成因与构造背景,从而为探讨古亚洲洋构造演化提供新的地质证据。



(a)东北地区大地构造略图,修改自文献[6];(b)西保安地区地质简图,修改自文献[6];(c)西保安岩组地层剖面图,修改自文献[3]

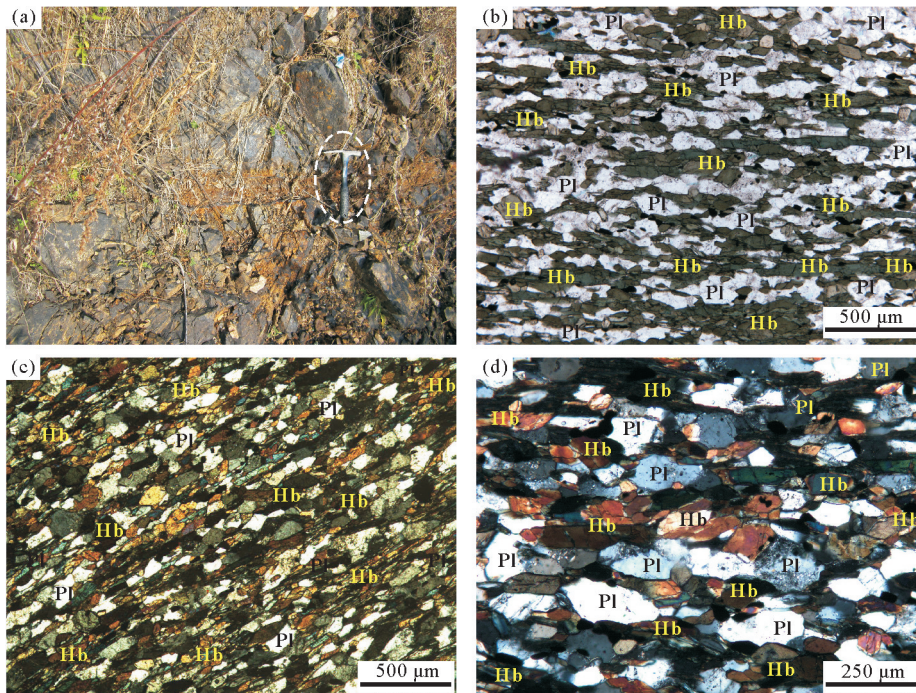
图 1 西保安地区构造位置及西保安岩组地层剖面图

Fig. 1 Tectonic location of the Xibao'an area and stratigraphic section of the Xibao'an Formation

1 地质背景与样品描述

研究区位于华北板块北缘东段(图 1(a)),隶属于辽源地体(亦称辽源增生带或白乃庙弧带)^[7-12]。西保安岩组主要出露于西保安村、姜大院、二郎头山等区域,均呈小捕虏体产出(图 1(b)),在西保安村出露规模最大,面积约 0.5 km²。由于受到花岗岩的侵入,顶底不全,出露厚度约 290 m(图 1(c)),主要岩石类型包括斜长角闪片岩、角闪变粒岩、石英片岩、云母片岩和大理岩等,中部夹数层层状、似层状或透镜状的含锰磷铁矿或磁铁矿石英岩,其中的斜长角闪片岩为本次研究对象。

野外观察发现,斜长角闪片岩剖面出露厚度 40~50 m,局部与薄层花岗片麻岩或斜长云母片岩呈互层状出露。岩石新鲜面呈深灰色(图 2(a)),片状构造。显微镜下观察,该岩石具有柱粒状变晶结构,主要由角闪石(50%)和斜长石(46%~47%)组成(图 2(b)~2(d))。斜长石多为他形粒状,部分可见聚片双晶,粒径 0.1~0.3 mm,定向分布,晶粒普遍有绢云母化及泥化。角闪石主要呈自形、半自形柱状及粒状,简单双晶及角闪石式解理发育,柱长为 0.05~0.50 mm,少量可达 0.7 mm,定向分布。斜长角闪片岩中见 2%~3%的片状黑云母,片径 0.1~0.2 mm,呈定向星点状分布。另外,见 1%的不透明矿物,呈半自形至他形粒状,粒径 0.05~0.10 mm,星散状分布。



(a)野外露头照片;(b)单偏光镜下照片;(c)~(d)正交偏光镜照片;Pl-斜长石;Hb-角闪石

图 2 西保安斜长角闪片岩野外及镜下照片

Fig. 2 Field photographs and photomicrographs of the Xibao'an amphibolite schist

2 分析测试方法

2.1 全岩主微量元素分析

本次研究对野外露头不同部位的 5 件斜长角闪片岩样品(XB-1~XB-5)进行全岩主微量元素分析。去除样品风化面和泥土之后,将样品破碎并研磨至 200 目(74 μm),在国土资源部济南矿产资源监督检测中心进行了全岩主微量元素测试。分别采用二甲酚橙法和动物胶凝聚重量法对 Al₂O₃ 和 SiO₂ 含量进行测定,其余主量元素以及 Sr、Ba、V、Cr 使用 IRIS-Intrepid II 型电感耦合等离子体发射光谱仪(inductively coupled plasma-optical emission spectrometry, ICP-OES)进行测定,微量元素使用 X-Series II 型电感

耦合等离子质谱仪(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)进行测定。测试过程严格按照国家标准 GB/T 14506—2010《硅酸盐岩石化学分析方法》执行,并采用中国国家地质标准参考材料 GSR-1、GSR-2 和 GSR-3 对数据质量进行监控,结果表明,主量元素和微量元素的分析精度分别优于 5% 和 10%。

2.2 锆石 U-Pb 定年

对一件斜长角闪片岩样品(XB-0, GPS: 125°34'4"E, 42°51'14")开展锆石 U-Pb 测年工作,样品粉碎以及锆石分选工作在河北省区域地质矿产调查研究所完成,锆石的制靶、阴极发光(cathodoluminescence, CL)图像拍摄以及激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, LA-ICP-MS)U-Pb 测年工作均在西北大学大陆演化与早期生命全国重点实验室完成。U-Pb 测年工作采用搭载 GeoLas 200M 型激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 型 ICP-MS,激光束斑为 24 μm ,采用 91500 标准锆石和人造硅酸盐玻璃 NIST SRM 610 对同位素和微量元素分馏进行校正。原始数据的处理通过 Glitter 4.0 软件完成,年龄的计算以及谐和图的绘制采用 Isoplot/Ex_ver3 宏程序完成。

2.3 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆演化与早期生命全国重点实验室完成,采用 RESOLUTION M-50 型准分子激光剥蚀系统(193 nm)联用 Nu Plasma II 型双聚焦多接收等离子体质谱仪(multi collector-coupled plasma-mass spectrometry, MC-ICP-MS)进行测试,激光束斑为 44 μm ,剥蚀位置与 U-Pb 测点位置略有偏移或保持一致,采用国际标准锆石 91500 和 GJ-1 进行外标校正和数据监控。

3 全岩地球化学特征及原岩恢复

主微量元素分析结果见表 1 和表 2。斜长角闪片岩样品的 SiO_2 含量 45.07%~51.05%,与基性岩浆岩的化学成分一致。样品具有中等的 TiO_2 (1.46%~2.62%)、 CaO (5.28%~8.13%) 含量,较高的 Al_2O_3 (15.36%~17.83%)、 MgO (7.29%~8.90%)、 TFe_2O_3 (7.09%~13.17%) 及 MnO (0.60%~0.92%) 含量, Na_2O 和 K_2O 含量分别为 2.98%~4.15% 和 0.72%~1.37%,对应的全碱含量为 3.99%~5.52%。在 A-C-FM、A-C-F 和 $\text{La/Yb}-\Sigma\text{REE}$ 等斜长角闪岩的原岩恢复图解中(图 3(a)~3(c)),斜长角闪片岩样品均落入岩浆岩区域,指示其原岩为基性岩浆岩。考虑到该基性岩经历了显著的变质作用,且具有相对较高的烧失量(2.79%~4.38%),选择稳定性元素 $\text{Zr/TiO}_2\text{-Nb/Y}$ 和 TFeO/MgO-SiO_2 图解对其进行岩石类型和系列的划分,斜长角闪片岩样品落入亚碱性玄武岩区域和拉斑系列-钙碱性系列过渡区(图 3(d)~3(e))。

表 1 西保安斜长角闪片岩主量元素分析结果

Table 1 Major element compositions of the Xibao'an amphibolite schist

样品	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	P_2O_5	LOI	Total
XB-1	49.14	2.25	17.77	6.42	1.93	5.46	7.51	1.37	3.92	0.63	0.21	3.37	99.79
XB-2	46.62	1.53	17.83	7.27	2.34	6.08	8.30	1.09	3.80	0.86	0.18	4.38	100.05
XB-3	45.07	2.62	15.36	9.41	2.64	8.13	8.90	1.01	2.98	0.87	0.15	2.94	99.82
XB-4	47.33	1.46	16.00	10.62	2.83	5.81	7.75	0.72	3.78	0.92	0.20	2.79	99.92
XB-5	51.05	2.11	17.82	5.38	1.89	5.28	7.29	1.37	4.15	0.60	0.16	3.11	100.02

西保安斜长角闪片岩的稀土元素总量 $52.93 \times 10^{-6} \sim 74.10 \times 10^{-6}$,在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 4(a))中,表现为轻微的轻稀土元素富集和平坦的重稀土配分模式,其 $(\text{La/Yb})_N$ 值为 2.15~2.40,与 E-MORB 一致^[16]。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4(b))中,斜长角闪片岩无明显的 Nb-Ta 异常,与 E-MORB 表现出一定的相似性^[16],但其 Rb、Ba 等大离子亲石元素明显富集,且显示一定的 Sr 和 Ti 正异常。

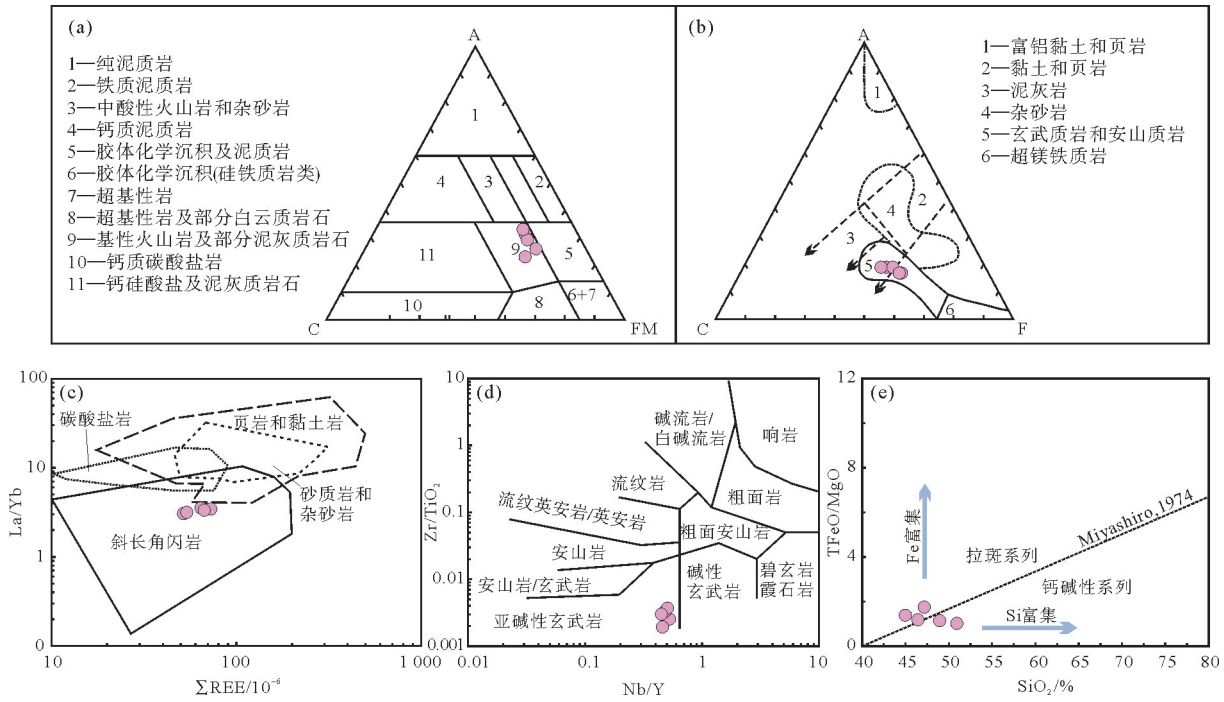
表 2 西保安斜长角闪片岩微量元素分析结果

Table 2 Trace element compositions of the Xibao'an amphibolite schist

10⁻⁶

样品	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce
XB-1	1.06	20.77	233.48	199.08	36.08	48.06	39.47	149.65	18.66	69.67	426.11	25.07	55.29	13.50	5.36	897.19	10.25	22.36
XB-2	0.94	24.24	254.50	208.00	40.88	53.78	47.05	158.70	19.10	39.17	339.40	22.00	49.35	10.87	4.84	707.50	8.77	20.13
XB-3	0.89	36.14	314.55	247.31	45.82	59.05	51.67	177.50	25.14	89.61	313.80	20.39	48.17	9.54	4.79	631.90	7.09	16.90
XB-4	0.96	31.80	248.69	209.74	38.17	51.90	45.45	186.90	30.54	126.08	274.00	23.18	51.37	11.95	5.07	329.92	9.35	21.25
XB-5	1.14	19.23	209.37	176.82	35.90	46.22	35.66	214.61	19.36	20.37	330.15	21.69	60.37	10.05	6.11	456.27	7.39	17.28

样品	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U
XB-1	3.26	15.02	4.11	1.37	4.29	0.76	4.86	0.98	2.88	0.45	3.06	0.45	1.43	0.99	11.05	7.38	3.31
XB-2	2.98	13.78	3.57	1.26	3.15	0.69	4.55	0.89	2.63	0.39	2.55	0.40	1.31	0.76	10.50	6.93	2.19
XB-3	2.30	10.08	2.79	0.89	2.98	0.50	3.36	0.75	2.26	0.34	2.35	0.34	1.24	0.61	8.13	6.57	1.94
XB-4	2.86	12.84	3.77	1.28	4.06	0.72	4.61	0.99	2.91	0.42	2.83	0.45	1.37	0.81	9.08	7.19	2.54
XB-5	2.46	10.59	2.85	0.90	3.04	0.54	3.47	0.81	2.36	0.37	2.40	0.38	1.56	0.63	10.82	6.60	2.13



(a) A-C-FM 图解; (b) A-C-F 图解; (c) La/Yb-ΣREE 图解; (d) Zr/TiO₂-Nb/Y 图解; (e) TFeO/MgO-SiO₂ 图解;
 (a)~(c) 的底图及相关参数的计算据文献[13]; (d)和(e)底图分别据文献[14]和[15]

图 3 西保安斜长角闪片岩原岩恢复及岩石类型和岩石系列划分图解

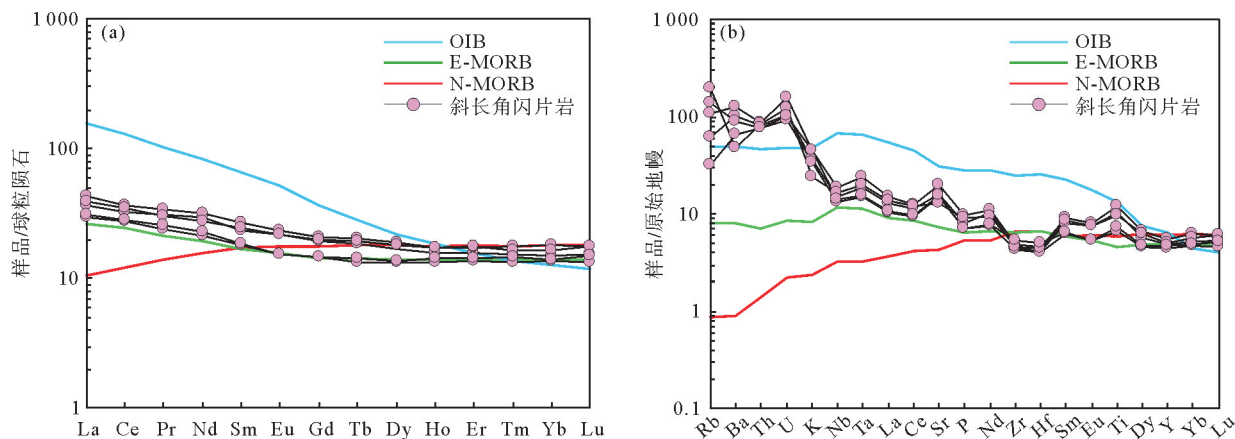
Fig. 3 Protolith reconstruction diagrams and discrimination diagrams of rock types and rock series for the Xibao'an amphibolite schist

4 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素特征

4.1 年代学特征

本次研究采用 LA-ICP-MS 对西保安斜长角闪片岩(样品 XB-0)中的 21 颗锆石进行了 U-Pb 测年, 测试结果见表 3 和图 5。样品中的锆石颗粒粒径 40~110 μm, 且形态和内部结构均呈多样性: 形态多为自形至半自形晶, 呈长柱状或断柱状, 少数锆石呈卵圆形; 内部结构方面, 部分锆石具有清晰或模糊的岩浆振荡环带, 其他锆石则表现出无分带、弱分带或杂乱的内部结构特征(图 5(a))。21 个测点中, 7 个测点由于

打穿或铅丢失等原因明显偏离谐和线,剩余 14 个测点均落在谐和线及其附近(图 5(b)),Th 和 U 含量分别为 $17 \times 10^{-6} \sim 956 \times 10^{-6}$ 和 $43 \times 10^{-6} \sim 739 \times 10^{-6}$,Th/U 值为 0.26~1.61。其中,有 6 个来自岩浆环带测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 281~270 Ma,加权平均年龄 274 ± 4 Ma(加权均方偏差(mean square weighted deviation,MSWD)为 0.76, $n=6$,平均值(mean)为 274 ± 4 Ma),代表斜长角闪片岩原岩的结晶年龄(图 5(c));还有 6 个测点年龄为 2 474~421 Ma,代表捕获/继承锆石的年龄;其他 2 个来自变质锆石的测点年龄分别为 251 ± 4 和 225 ± 4 Ma,明显晚于岩浆锆石年龄,可能为成岩期后变质作用的时间。



(a)球粒陨石标准化稀土元素配分图;(b)原始地幔标准化微量元素蛛网图;洋岛玄武岩(ocean island basalt,OIB)、正常型洋中脊玄武岩(normal mid-ocean ridge basalt,N-MORB);富集型洋中脊玄武岩(enriched mid-ocean ridge basalt,E-MORB);标准化数值据文献[16]

图 4 西保安斜长角闪片岩球粒陨石标准化稀土元素配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图

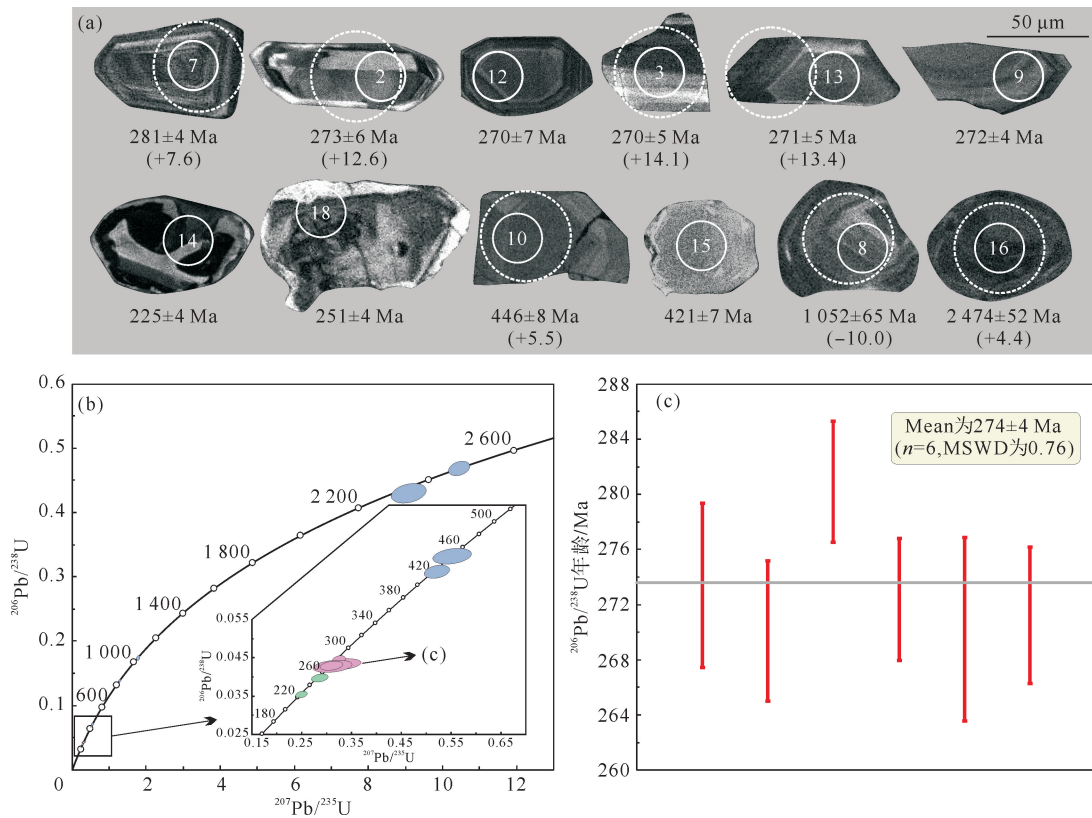
Fig. 4 Chondrite-normalized REE pattern and primitive mantle-normalized trace element spider diagram for the Xibao'an amphibolite schist

表 3 西保安斜长角闪片岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data from the Xibao'an amphibolite schist

测点号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
XB-0-01*	463	659	0.70	0.095 40	0.003 95	0.471 67	0.014 67	0.035 85	0.000 62	1 536	76	227	4
XB-0-02	17	43	0.40	0.055 36	0.004 63	0.330 70	0.025 86	0.043 32	0.000 97	426	177	273	6
XB-0-03	33	82	0.41	0.052 67	0.003 36	0.310 73	0.017 78	0.042 78	0.000 82	315	139	270	5
XB-0-04	105	262	0.40	0.153 32	0.006 48	9.095 86	0.313 65	0.430 19	0.009 99	2 383	70	2 307	45
XB-0-05*	82	222	0.37	0.082 92	0.003 14	0.569 56	0.015 27	0.049 81	0.000 81	1 267	72	313	5
XB-0-06*	2	1	1.74	0.114 05	0.053 23	4.516 45	2.10 543	0.287 15	0.051 05	1 865	666	1 627	256
XB-0-07	575	739	0.78	0.052 87	0.002 03	0.324 74	0.009 00	0.044 54	0.000 71	323	85	281	4
XB-0-08	146	204	0.71	0.074 37	0.002 43	1.781 65	0.035 17	0.173 72	0.002 70	1 052	65	1 033	15
XB-0-09	302	537	0.56	0.052 69	0.002 26	0.313 61	0.010 54	0.043 15	0.000 72	316	95	272	4
XB-0-10	146	188	0.78	0.055 90	0.003 03	0.552 19	0.025 86	0.071 63	0.001 36	448	117	446	8
XB-0-11*	56	597	0.09	0.096 50	0.003 26	0.467 30	0.009 28	0.032 86	0.000 52	1 558	62	208	3
XB-0-12	320	340	0.94	0.052 81	0.004 71	0.311 77	0.026 10	0.042 81	0.001 08	321	191	270	7
XB-0-13	98	144	0.68	0.052 35	0.002 93	0.310 26	0.015 12	0.042 97	0.000 80	301	123	271	5
XB-0-14	956	595	1.61	0.051 10	0.002 09	0.249 77	0.007 79	0.035 44	0.000 58	245	91	225	4
XB-0-15	120	195	0.62	0.056 04	0.002 35	0.521 57	0.016 94	0.067 49	0.001 13	454	91	421	7
XB-0-16	364	295	1.23	0.161 78	0.005 08	10.455 18	0.191 72	0.468 61	0.007 63	2 474	52	2 478	34
XB-0-17*	550	837	0.66	0.086 64	0.003 03	0.312 94	0.007 24	0.026 19	0.000 42	1 353	66	167	3
XB-0-18	120	454	0.26	0.052 21	0.002 45	0.286 14	0.011 03	0.039 74	0.000 69	295	104	251	4
XB-0-19*	0.29	0.878	0.33	0.720 93	0.066 04	28.431 37	2.405 51	0.285 96	0.022 33	4 773	125	1 621	112
XB-0-20*	429	1 800	0.24	0.066 80	0.002 23	0.339 15	0.007 18	0.036 82	0.000 57	832	68	233	4
XB-0-21	209	382	0.55	0.066 42	0.002 43	1.223 10	0.031 60	0.133 54	0.002 20	820	75	808	12

注:测点号标*的数据为不谐和年龄数据,未用于年龄讨论。



(a)代表性锆石 CL 图像,实线圈为 U-Pb 年龄打点位置,虚线圈为 Lu-Hf 同位素打点位置,

括号内数字代表相应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值;(b)锆石 U-Pb 年龄谐和图;(c)加权平均年龄图

图 5 西保安斜长角闪片岩代表性锆石 CL 图像、锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄图

Fig. 5 Representative CL images, zircon U-Pb concordia diagram and weighted average age diagram of zircons from the Xibao'an amphibolite schist

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素特征

在锆石 U-Pb 测年的基础上,选择 8 颗锆石进行 Lu-Hf 同位素测试,其中 4 颗早二叠世(~ 274 Ma)锆石为基性岩成岩过程中的岩浆锆石,另外 4 颗锆石为捕获/继承锆石(年龄分别为 2 474、1 052、446 和 421 Ma),测试结果见表 4。4 颗早二叠世岩浆锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.001 41~0.002 22 和 0.282 83~0.283 01,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 7.6~14.1,单阶段 Hf 模式年龄(T_{DMI})介于 615~349 Ma。4 颗捕获/继承锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.000 56~0.001 62 和 0.281 35~0.282 71,太古代(2 474 Ma)锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.4,中元古代(1 052 Ma)锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -10.0,2 颗早古生代锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 5.5 和 6.7。

表 4 西保安斜长角闪片岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 4 Hf isotopic analysis for zircons from the Xibao'an amphibolite schist

测点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 1\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_t$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	T_{DMI}/Ma
XB-0-02	274	0.046 47	0.001 41	0.282 97	0.000 02	0.282 96	6.8	12.6	-0.96	411
XB-0-03	274	0.062 58	0.001 86	0.283 01	0.000 02	0.283 00	8.5	14.1	-0.94	349
XB-0-07	274	0.049 58	0.001 58	0.282 83	0.000 04	0.282 82	1.9	7.6	-0.95	615
XB-0-08	1 052	0.047 35	0.001 35	0.281 86	0.000 02	0.281 83	-32.3	-10.0	-0.96	1 975
XB-0-10	446	0.057 15	0.001 62	0.282 66	0.000 03	0.282 65	-3.8	5.5	-0.95	847
XB-0-13	274	0.067 55	0.002 22	0.282 99	0.000 05	0.282 98	7.8	13.4	-0.93	381
XB-0-15	421	0.050 03	0.001 38	0.282 71	0.000 05	0.282 70	-2.2	6.7	-0.96	774
XB-0-16	2 474	0.017 94	0.000 56	0.281 35	0.000 03	0.281 33	-50.2	4.4	-0.98	2 621

5 讨论

5.1 西保安岩组的形成时代

前人研究显示,西保安岩组斜长角闪片岩呈层状或似层状产出^[3],是该岩组变质火山-沉积建造中的主要岩石类型之一,对于厘定该岩组的时代具有代表性意义。矿物组合特征与地球化学特征表明斜长角闪片岩的原岩为基性岩浆岩。斜长角闪片岩中 6 个来自岩浆结晶环带的测点具有高 Th/U 比(0.40~0.94),指示了岩浆成因,测得的加权平均年龄(274 ± 4 Ma)应代表斜长角闪片岩原岩的结晶年龄(图 5),首次证实了西保安岩组含有早二叠世末期岩浆活动产物。值得注意的是,近期有学者在西保安岩组识别出了晚奥陶世(约 455 Ma)斜长角闪片麻岩,其原岩为安山岩^[17],表明西保安岩组含有多期岩浆岩。因此推测,西保安岩组可能是一套包含不同时代地质体的构造混杂岩。

5.2 蚀变作用、地壳混染与结晶分异

西保安岩组斜长角闪片岩相对较高的烧失量(2.79%~4.38%),以及斜长石普遍存在绢云母化及泥化现象,指示其中的活动性元素(如 Na、K 等碱金属元素和 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素)可能受到蚀变作用的影响。因此,有必要评估变质与蚀变作用对元素稳定性的影响。由于 Zr 元素在变质和蚀变过程中通常保持稳定性,因此常被用于评估其他微量元素的活动性^[18]。西保安岩组斜长角闪片岩的 Rb、Ba、Sr 等活泼元素与 Zr 之间的相关性不明显,Cr、Co、Ni 等过渡金属元素与 Zr 表现出良好的负相关性,Nb、Ta、Hf、Y、Th 等高场强元素以及稀土元素则与 Zr 呈良好的正相关性(表 2)。因此,选取过渡金属元素、高场强元素以及稀土元素等未受蚀变作用影响的元素开展岩石成因及构造背景研究。

幔源岩浆在上升过程中易遭受地壳物质混染,在探讨岩石成因之前,须评估并排除地壳混染的影响。西保安岩组斜长角闪片岩的 SiO₂ 含量较低(45.07%~51.05%),Mg[#] (Mg[#] = $100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ (摩尔比))值较高(51~65),指示地壳混染的程度有限,样品 Nb-Ta-Ti 负异常以及 Eu 负异常均不明显,进一步支持这一认识。此外,受地壳混染的幔源岩浆岩通常具有较高的 La/Sm 值(>5)以及较低的 Nb/La 值(<1)^[19-20];而斜长角闪片岩的 La/Sm 值较低(2.46~2.59)、Nb/La 值较高(1.24~1.36),进一步排除了地壳混染的可能性。

幔源原始岩浆通常具有高 Mg[#] 值(>70)以及 Cr(> $1\,000 \times 10^{-6}$)、高于 Ni($400 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$)等相容元素含量^[21],相比之下,西保安岩组斜长角闪片岩的 Cr($176.82 \times 10^{-6} \sim 247.31 \times 10^{-6}$)和 Ni($46.22 \times 10^{-6} \sim 59.05 \times 10^{-6}$)含量较低,Mg[#] 值(51~65)变化较大,表明其母岩浆经历了一定程度的分离结晶作用。斜长角闪片岩的 CaO 以及 Cr、Co、Ni 等过渡金属元素均与 MgO 之间存在显著的正相关性(表 1 和表 2),指示橄榄石与辉石等镁铁质矿物的分离结晶作用。TFe₂O₃ 与 MgO 之间同样具有良好的正相关性(表 1),表明岩浆演化过程可能经历了磁铁矿的分离结晶作用。

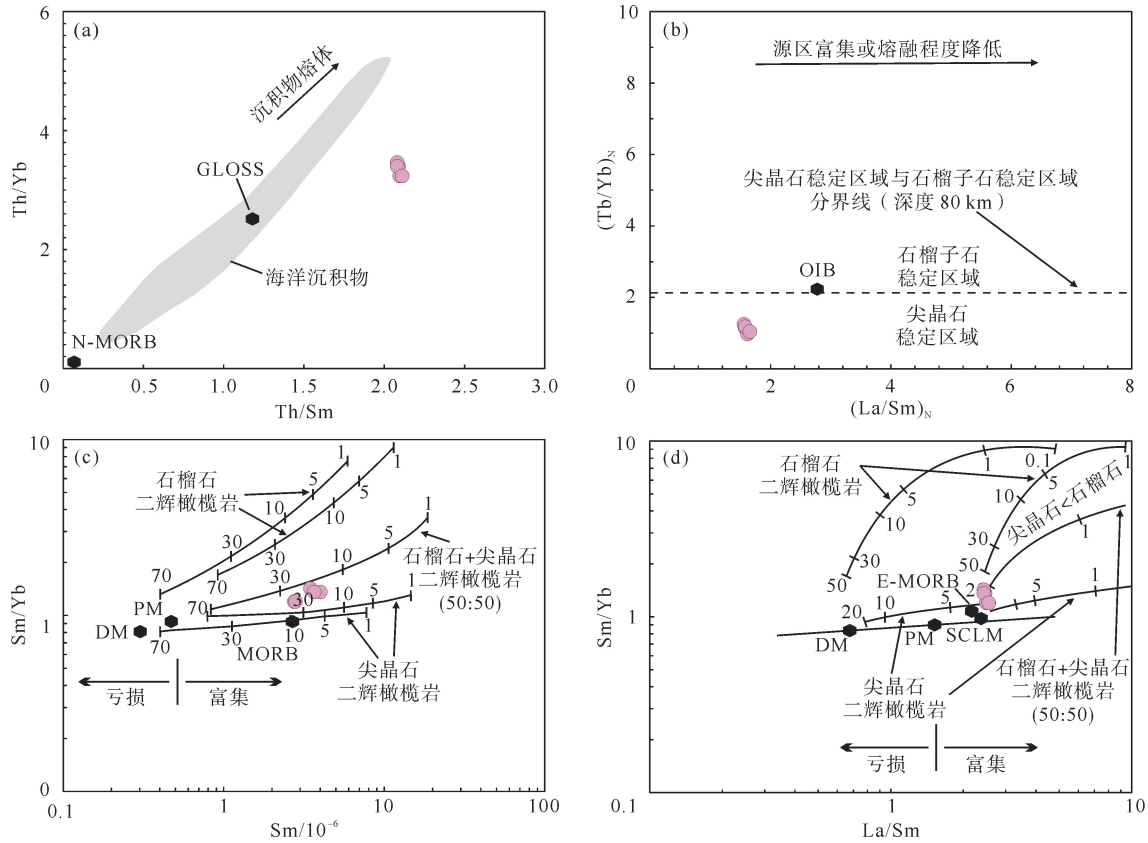
5.3 岩石成因

西保安岩组斜长角闪片岩的 Nb/Ta、Zr/Hf 及 Lu/Yb 值分别为 13.6~16.0、37.5~38.8 及 0.14~0.16,与幔源岩浆特征(Nb/Ta=17.8、Zr/Hf=37.0、Lu/Yb=0.14~0.15)一致,表明其母岩浆起源于地幔而非下地壳^[19]。研究表明,软流圈地幔通常具有较低的 La/Ta(~10)和 La/Nb(<1)值,岩石圈地幔则表现出较高的 La/Ta(>20)和 La/Nb(>1)值^[7-8]。西保安岩组斜长角闪片岩的 La/Ta 和 La/Nb 值分别为 10.4~11.7 和 0.74~0.81,与软流圈地幔特征相近;同时,样品不具有 Nb、Ta、Ti 等高场强元素的显著亏损特征,亦区别于典型的岩石圈地幔^[20],故推测其岩浆源区为软流圈地幔。此外,斜长角闪片岩 4 颗早二叠世岩浆锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 7.6~14.1,指示其来源于一个相对亏损的地幔源区。

Th 以及轻稀土元素容易被俯冲沉积物熔体迁移,被俯冲沉积物熔体交代的地幔源区通常富集 Th 元素,且有较高的 Th/Sm、Th/Yb 以及 Th/Nd 值^[22]。西保安岩组斜长角闪片岩的 Th 含量($6.57 \times 10^{-6} \sim 7.38 \times 10^{-6}$)以及 Th/Sm(1.80~2.35)和 Th/Yb(2.41~2.80)值相对较高,在 Th/Yb-Th/Sm 图解中落在海洋沉积物熔体区域(图 6(a)),表明其地幔源区曾遭受俯冲沉积物熔体的交代作用。

稀土元素比值受部分熔融以及分离结晶作用的影响几乎可忽略不计,因此 Tb/Yb、Sm/Yb、La/Sm 值是评估地幔源区部分熔融程度和判别残留矿物相的有效工具^[23]。西保安岩组斜长角闪片岩具有较高的重稀土

元素($12.88 \times 10^{-6} \sim 17.73 \times 10^{-6}$)和 Y($20.39 \times 10^{-6} \sim 25.07 \times 10^{-6}$)含量,较低的 Sr/Y(11.82~17.00)和 Dy/Yb(1.43~1.78)值,表明其地幔源区部分熔融主要发生在尖晶石稳定区,可能不存在石榴子石的残余^[23],这与斜长角闪片岩样品在(Tb/Yb)_N-(La/Sm)_N图解中落入尖晶石稳定区域是一致的(图 6(b))。在 Sm/Yb-Sm 以及 Sm/Yb-La/Sm 图解中,斜长角闪片岩样品均落在尖晶石二辉橄榄岩熔融曲线附近(图 6(c)~6(d)),故推测其母岩浆可能是由尖晶石二辉橄榄岩经过 10%~30%的部分熔融形成。



(a)Th/Yb-Th/Sm 图解^[18]; (b)(Tb/Yb)_N-(La/Sm)_N 图解^[23]; (c)Sm/Yb-Sm 图解^[24]; (d)Sm/Yb-La/Sm 图解^[24]; 全球俯冲沉积物(global subducting sediment, GLOSS)数据据文献^[25]; OIB、N-MORB、E-MORB 及原始地幔(primitive mantle, PM)数据据文献^[16]; 亏损地幔(depleted mantle, DM)及大陆岩石圈地幔(sub-continental lithospheric mantle, SCLM)数据据文献^[24]

图 6 西保安斜长角闪片岩的岩石成因判别图

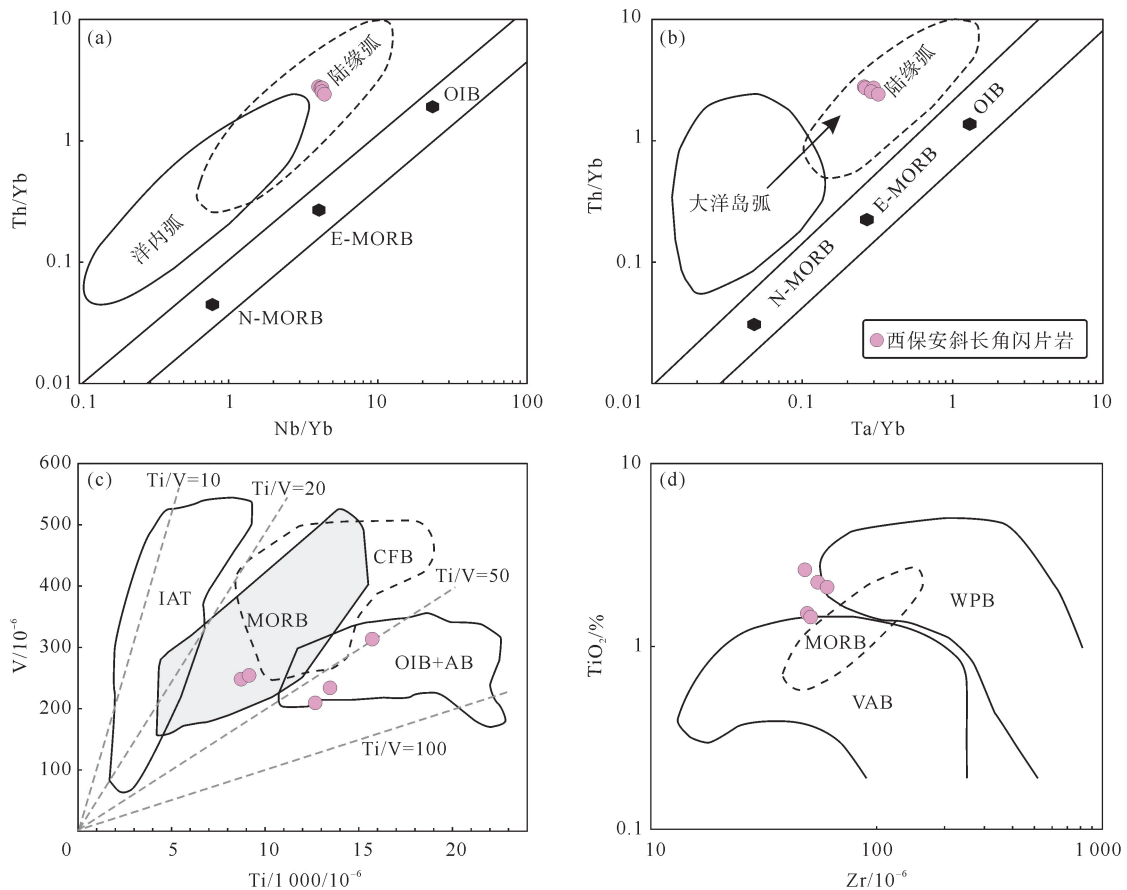
Fig. 6 Petrogenesis discrimination diagrams for the Xibao'an amphibolite schist

综上所述,认为西保安岩组斜长角闪片岩的岩浆源区是被俯冲沉积物熔体交代过的亏损软流圈地幔,其母岩浆的形成与尖晶石二辉橄榄岩 10%~30%的部分熔融有关,且在岩浆演化过程中经历了橄榄石与辉石等镁铁质矿物以及磁铁矿等矿物的分离结晶作用。

5.4 构造背景

华北板块北缘东段在古生代期间的构造演化主要受古亚洲洋构造体系制约。近十几年来,在该区域识别出大量晚石炭世—晚二叠世的俯冲相关岩浆岩。结合古生物化石分布特征与沉积序列等方面证据,多数研究认为该区在二叠纪处于古亚洲洋板块的持续俯冲作用下,俯冲过程延续至二叠纪末—三叠纪初,最终导致古亚洲洋的闭合^[7-12,26-29]。尽管如此,关于华北板块北缘东段早—中二叠世的动力学背景仍存在不同认识。部分学者基于东西向广泛分布的二叠纪安第斯型岩浆岩组合,提出该区在早—中二叠世处于活动大陆边缘环境^[9-11,26-27,29]。例如,Cao 等^[11]报道了辽北大孤家镇中二叠世(~270 Ma)放牛沟同碰撞型过铝质淡色花岗岩,认为其反映了华北板块与北部松辽增生地体之间因局部造山作用处于挤压背景下的地壳增厚状态。而 Liu 等^[12]基于吉林东部六棵松地区发现的中二叠世(263~262 Ma)双峰式侵入岩,主张该时期吉林中东部地区处于造山后伸展构造背景。

西保安岩组斜长角闪片岩原岩的形成时代为早二叠世末—中二叠世初(274 ± 4 Ma),无疑为解决上述争议提供了关键的岩石“探针”。该基性岩具有与 E-MORB 相似的稀土元素配分模式以及微量元素地球化学特征(图 4),其母岩浆来源于亏损的软流圈地幔,可能与尖晶石二辉橄榄岩的减压熔融有关,指示其形成于伸展构造背景。此外,斜长角闪片岩样品虽在 Th/Yb-Nb/Yb 和 Th/Yb-Ta/Yb 图解中落在陆缘弧范围内,但在 V-Ti/1 000 和 TiO_2 -Zr 图解中落在 MORB 范围及其附近(图 7),进一步印证了上述观点。由此看来,尽管华北板块北缘东段在二叠纪整体上类似安第斯型活动大陆边缘,但在早—中二叠世存在局部伸展作用,从而形成了伸展背景下的岩浆岩。



(a) Th/Yb-Nb/Yb 图解; (b) Th/Yb-Ta/Yb 图解; (c) V-Ti/1 000 图解; (d) TiO_2 -Zr 图解; 底图据文献[17]

图 7 西保安斜长角闪片岩的岩石构造环境判别图

Fig. 7 Tectonic discriminant diagrams for the Xibao'an amphibolite schist

近两年来,部分学者利用碎屑锆石 Eu/Eu^* ($2\text{Eu}_N/(\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$ (N 代表球粒陨石标准化))值和岩浆岩全岩 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 与 Sr/Y 值,重建了华北板块北缘东段古生代时期的地壳厚度演化^[26-27],为理解上述不同动力学背景下形成的岩浆岩共存现象提供了重要的理论框架。重建结果表明,华北板块北缘东段在石炭纪至早—中二叠世期间经历了显著的地壳减薄^[26-27]。针对这一减薄过程,前人提出了两种可能的机制模型:①古亚洲洋板块南向的高角度俯冲引发了华北板块北缘东段的地壳伸展与减薄;②正地形扩张洋脊的俯冲首先导致初期地壳增厚,随后形成的板片窗和软流圈上涌进一步诱发了地壳伸展与减薄^[26-27]。总体而言,华北板块北缘在早—中二叠世处于弧后盆地伸展背景,至约 270 Ma 俯冲角度由高角度转为低角度,最终导致古亚洲洋的闭合与地壳增厚^[26]。

综上,早二叠世末—中二叠世初是华北板块北缘东段地壳由减薄向增厚转变的关键阶段。受古亚洲洋板块前进式低角度俯冲^[26]或弧-陆碰撞作用^[27]的影响,该区域整体上应处于挤压构造背景。这一过程不仅促使古亚洲洋逐渐闭合,同时也在华北板块北缘东段诱发了放牛沟同碰撞型过铝质淡色花岗岩(~ 270 Ma)以及红旗岭与小梨河埃达克质花岗岩(264~260 Ma)的形成^[28-29]。据此推测,由于古亚洲洋

板块俯冲的不均一性、碰撞板块边界形态不规则或局部板片窗的存在,华北板块北缘东段整体处于挤压背景下,但局部地区可能处于伸展状态,西保安 E-MORB 型基性岩正是该局部伸展背景下岩浆作用的产物。

6 结论

1) 西保安岩组斜长角闪片岩的原岩为基性岩浆岩,锆石 U-Pb 年龄为 274 ± 4 Ma,代表了岩浆岩的结晶时间。

2) 岩石呈稀土总量偏低、轻微的轻稀土元素富集和平坦的重稀土配分模式,其 $(La/Yb)_N$ 值介于 2.15~2.40,微量元素无明显的 Nb-Ta 异常等特征,与 E-MORB 相似。

3) 西保安变基性岩的岩浆源区为受俯冲沉积物熔体交代的亏损软流圈地幔,是由尖晶石二辉橄榄岩 10%~30% 的部分熔融,并在演化过程中发生了以橄榄石、辉石及磁铁矿为主的分离结晶作用而形成。

4) 西保安早二叠世基性岩形成于华北板块北缘东段地壳由减薄向增厚转变的阶段,可能是该区域局部伸展背景下的岩浆作用产物。

参考文献:

- [1] 姜正龙,彭玉鲸,张为民,等.吉林辽源西保安群花岗岩质糜棱岩 SHRIMP U-Pb 定年[J].岩石学报,2014,30(6):1748-1756.
JIANG Zhenglong,PENG Yujing,ZHANG Weimin,et al. SHRIMP U-Pb dating on granitic mylonite for Liaoyuan Xibaoan Group[J]. Acta Petrologica Sinica,2014,30(6):1748-1756.
- [2] 贾大成,卢焱.吉林中部西保安期拉张型被动大陆边缘地质特征[J].长春地质学院学报,1997,27(4):402-406.
JIA Dacheng,LU Yan. The geological characteristics of the extensional passive continental margin of Xibao'an stage in central Jilin Province [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences,1997,27(4):402-406.
- [3] 周晓东,彭玉鲸,路孝平,等.中国区域地质志·吉林志[M].北京:地质出版社,2023.
ZHOU Xiaodong,PENG Yujing,LU Xiaoping,et al. Regional geology of China, Jilin Province[M]. Beijing: Geological Publishing House,2023.
- [4] MAFRA C, LOUCKS R, FIORENTINI M. Behaviour of gold during partial melting of supra subduction zone mantle wedge[J/OL]. Earth-Science Reviews,2025,266:105111. DOI:10.1016/j.earscirev.2025.105111.
- [5] 季志刚,宋宗超,宋志刚.山东永丹山地区新太古代变基性岩地球化学特征及其构造意义[J].山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(3):14-25.
JI Zhigang,SONG Zongchao,SONG Zhigang. Geochemical characteristics and tectonic significance of Neoproterozoic metamorphic rocks in Gongdanshan area, Shandong Province[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2023,42(3):14-25.
- [6] SUN S N, SONG Z G, HAN Z Z, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous volcanic rocks in the southeastern margin of the Songliao Basin, NE China: Implications for the geodynamic evolution of Paleo-Pacific Ocean[J]. International Journal of Earth Sciences,2024,113:687-712.
- [7] ZHANG N, LIU Z H, XU Z Y, et al. Tectonic evolution of the Middle-Late Permian orogenic belt in the eastern part of the CAOB: Implications from the magmatism in the Changchun-Kaiyuan area[J]. Geological Magazine,2023,160:1875-1892.
- [8] ZENG H, SONG D F, XIAO W J, et al. Late Paleozoic diachronous subduction initiation of the SE Paleo-Asian Ocean: Implications for tectonic transition from passive to active continental margin along northern North China Craton[J/OL]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems,2025,26. DOI:10.1029/2025GC012197.
- [9] 宋志刚,丛文爽,张天宇,等.吉林省石头口门地区早二叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(1):41-52.
SONG Zhigang, CONG Wenshuang, ZHANG Tianyu, et al. Detrital zircon U-Pb ages from Early Permian sandstones in Shitoukoumen area, Jilin Province and their geological significance[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2024,43(1):41-52.
- [10] WU Z J, YANG X Y, MA Y S, et al. A synthesis of geochemistry of Mesozoic igneous rocks in NE China and tectonic superposition and transformation of the easternmost Central Asian Orogenic Belt[J/OL]. Journal of Asian Earth Sciences,2022,227. DOI:10.1016/j.jseaes.2021.105032.
- [11] CAO H H, XU W L, PEI F P, et al. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic-Early Mesozoic

- intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block[J]. *Lithos*, 2013, 170-171.
- [12] LIU S, HU R Z, GAO S, et al. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Permian granodiorite and associated gabbro in the Songliao Block, NE China and implications for growth of juvenile crust[J]. *Lithos*, 2009, 114(3/4): 423-436.
- [13] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- WANG Renmin, HE Gaopin, CHEN Zhenzhen, et al. Graphie method for protolith metamorphic rocks[M]. Beijing: Geological publishing House, 1987.
- [14] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 28: 459-469.
- [15] MYASHIRO A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins[J]. *American Journal of Science*, 1974, 274(4): 321-355.
- [16] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [17] 孙胜男. 华北板块北缘东段吉林中部地区寒武纪—泥盆纪构造演化[D]. 青岛: 山东科技大学, 2025.
- SUN Shengnan. Cambrian-Devonian tectonic evolution of the central Jilin Province in the eastern segment of the northern margin of the North China Craton[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2025.
- [18] MANIKYAMBA C, SANTOSH M, SUBRAMANYAM K S V, et al. Forearc and back-arc mantle characteristics of the mafic-ultramafic rocks of simlipal complex, Singhbhum Craton, India[J/OL]. *Lithos*, 2022, 432-433. DOI: 10. 1016/j. lithos. 2022. 106889.
- [19] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the continental crust[M]//Holland H D, Turekian K K. Treatise on geochemistry. Oxford: Pergamon, 2003: 1-64.
- [20] SALTERS V J M, SHIMIZU N. World-wide occurrence of HFSE-depleted mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 2177-2182.
- [21] LITVAK V D, POMA S. Geochemistry of mafic Paleocene volcanic rocks in the Valle del Cura region; Implications for the petrogenesis of primary mantle-derived melts over the Pampean flat-slab[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2010, 29: 705-716.
- [22] ELBURG M A, BERGEN M A, HOOGEWERFF J, et al. Geochemical trends across an arc-continent collision zone: Magma sources and slab-wedge transfer processes below the Pantar Strait volcanoes, Indonesia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 2771-2789.
- [23] PEARCE J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 2008, 100: 14-48.
- [24] ALDANMAZ E, PEARCE J A, THIRLWALL M F, et al. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, 102: 67-95.
- [25] PLANK T, LANGMUIR C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. *Chemical Geology*, 1998, 145: 325-394.
- [26] SONG C, PEI F P, XU W L, et al. Subduction history of the Paleo-Asian oceanic slab along the northern margin of the North China Craton: A case study of zircons and cherts from central Jilin Province, NE China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2024, 136(11/12): 4761-4774.
- [27] HOU X X, DU Q X, CHANG Y F, et al. A Mid-Late Permian transition from oceanic subduction to continental collision in the northern margin of the North China Craton(NE China)[J/OL]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2025, 294. DOI: 10. 1016/j. jseaes. 106805.
- [28] 宋健, 刘志宏, 王超, 等. 吉林中部红旗岭北沟花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义[J]. *世界地质*, 2017, 36(2): 391-401.
- SONG Jian, LIU Zhihong, WANG Chao, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of Beigou granites from Hongqiling area in central Jilin and its geological implication[J]. *World Geology*, 2017, 36(2): 391-401.
- [29] WANG Z J, XU W L, PEI F P, et al. Geochronology and geochemistry of middle Permian-Middle Triassic intrusive rocks from central-eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern segment of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Lithos*, 2015, 238: 13-25.