

山东汞丹山地区新太古代变基性岩 地球化学特征及其构造意义

季志刚^{1,2}, 宋宗超³, 宋志刚¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国冶金地质总局青岛地质勘查院, 山东 青岛 266109;

3. 山东省煤田地质局第二勘探队, 山东 济宁 272007)

摘要:为探讨华北克拉通鲁西地区前板块构造与板块构造体制转换时间问题,利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和全岩主微量元素特征对山东沂水地区汞丹山一带的新太古代变基性岩进行了年代学和地球化学分析。汞丹山变基性岩为斜长角闪岩,具有较强的面理化特征,主要由角闪石和斜长石组成,其原岩(玄武岩/安山岩)的结晶年龄为 $2\ 626\pm 28\text{ Ma}$,可划分为拉斑系列和钙碱性系列,拉斑系列的岩浆源区可能为亏损地幔,且形成过程中有俯冲流体/熔体的参与,而钙碱性系列与太古宙硅质高镁玄武岩具有相似的地球化学特征,是俯冲板片流体或含水熔体交代的地幔楔在相对较浅的条件下发生较程度部分熔融的产物。汞丹山变基性岩以及华北克拉通已识别出的一系列新太古代晚期玄武质-安山质岩浆岩均存在明显的 Nb、Ta、P、Ti 亏损,与岛弧玄武岩的特征一致,表明华北克拉通在新太古代晚期经历了大规模的俯冲作用。

关键词:华北克拉通;鲁西地区;柳杭岩组;太古宙;构造演化

中图分类号:P581

文献标志码:A

Geochemical characteristics and tectonic significance of Neoproterozoic meta-mafic rocks in Gongdanshan area, Shandong Province

Ji Zhigang^{1,2}, Song Zongchao³, Song Zhigang¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Qingdao Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Qingdao 266109, China;

3. The Second Prospecting Team of Shandong Coal Geology Bureau, Jining 272007, China)

Abstract: To discuss the conversion time of pre-plate tectonic and plate tectonic systems of Western Shandong Province in the North China Craton, we present chronological and geochemical studies of Neoproterozoic meta-mafic rocks in the Gongdanshan area of Yishui Country, Shandong Province, by using the methods of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and whole-rock major and trace elemental analysis. The Gongdanshan meta-mafic rocks are amphibolites mainly composed of hornblende and plagioclase with obvious characteristics of foliation. The protolith for the Gongdanshan meta-mafic rocks (basalt/andesite), with a crystallization age of $2\ 626\pm 28\text{ Ma}$, can be divided into tholeiitic series and calc-alkaline series. The magmatic source of tholeiitic samples is probably a depleted mantle and subduction-related fluids/melts may have been involved in the generation of the tholeiitic rocks. The calc-alkaline samples have similar geochemical characteristics with Archean siliceous high magnesium basalt. The magmas that

收稿日期:2022-12-20

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2019PD001)

作者简介:季志刚(1989—),男,山东潍坊人,工程师,硕士,主要从事地质勘查和地球化学研究。

宋志刚(1988—),男,山东滨州人,讲师,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

formed the calc-alkaline samples were generated by a relatively higher degree of partial melting of a mantle wedge that was previously metasomatized by slab-derived fluids or melts at a relatively lower level. The Gongdanshan metamafic rocks, as well as other identified Late Neoproterozoic basaltic-andesitic magmatic rocks in the North China Craton, show obvious depletion of Nb, Ta, P, and Ti, which is consistent with those island arc basalt, implying that large-scale oceanic subduction would take place in the NCC during the Late Neoproterozoic.

Key words: North China Craton; Western Shandong; Liuhang Formation; Archean; tectonic evolution

在地球漫长的演化过程中,太古宙(约 4.0~2.5 Ga)占据了 30% 以上的演化历史。该时期稳定克拉通的形成与生长机制、前板块构造与板块构造体制转换时间以及绿岩带和奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩(trondhjemite-tonalite-granodiorite, TTG)岩套的成因和动力学背景等是前寒武纪地质学领域的关键科学问题,也是固体地球科学研究的热点和难点^[1]。揭示这些关键地质事件的性质与过程,是认识地球早期演化的关键。众多地质学家从不同角度对世界各地早前寒武纪克拉通开展了大量研究,试图揭秘地球早期演化的过程^[1-4]。尽管目前关于前板块构造与板块构造体制转换时间,亦即全球板块构造体制的启动时间仍存在争议,但越来越多来自榴辉岩、蛇绿岩、高压矿物包体以及大量钙碱性火山岩的证据显示,板块构造作用可能在中-新太古代(约 3.0~2.5 Ga)就已启动,如 Furnes 等^[2]对格陵兰岛东南部 Isua 表壳岩带中 3.8 Ga 的席状岩墙杂岩开展了地球化学及氧同位素研究,提出该杂岩是地球上最古老的蛇绿岩之一,地球洋底扩张和板块构造运动的启动发生在 3.8 Ga; Tappe 等^[3]对格陵兰岛西南部金伯利岩中的新太古代(2.7 Ga)榴辉岩包体开展了地球化学及氧同位素研究,结果表明其原岩为遭受过海底蚀变的洋壳岩石,并提出俯冲带玄武质俯冲板片的部分熔融是地球早期陆壳的主要生长方式,亦即地球上板块俯冲作用的启动早在 2.7 Ga 就已发生; Hastie 等^[4]利用 Ontong Java 洋底高原无水岩石样品进行了高 P - T 条件下的英云闪长岩生成模拟实验,提出地球上大陆形成于 4 Ga,随后约 30~45 km 的始太古代洋壳的俯冲和部分熔融改变了地幔和始太古代环境和生态系统。因此,前寒武纪板块俯冲体系的研究对于认识地球早期的板块构造演化具有重要启示。

华北克拉通位于中国北部地区(图 1),面积约 150 万 km^2 ,经历了约 38 亿年的漫长演化过程,是世界上最早的克拉通之一,也是记录地球早期演化的关键地区。近几十年来,国内外地质学家陆续在华北克拉通开展了一系列构造地质学、变质岩岩石学、同位素年代学和地球化学等方面的研究工作,使得华北克拉通的研究程度不断提高。已达成的基本共识是,华北克拉通在太古宙主要经历了古地壳的形成(~3.8 Ga)、陆壳增生(2.9~2.7 Ga)和地壳重熔及变质作用(~2.5 Ga)三个阶段^[5],且在新太古代末期(~2.5 Ga)和古元古代末期(约 1.9~1.8 Ga)经历了两次与陆壳增生和克拉通化相关的关键构造事件^[6]。然而,对于华北克拉通太古宙—古元古代演化的具体过程,尤其是新太古代陆壳增生的动力学背景仍存在不同认识,部分学者基于对科马提岩和科马提质玄武岩的研究提出了地幔柱机制下的太古宙陆壳生长模式^[7],而另有学者根据钙碱性岩浆岩、赞岐岩和埃达克质岩石组合的存在,提出了新太古代晚期的板块构造机制模型^[8]。因此,要精细重建华北克拉通太古宙—古元古代时期的构造演化过程,尤其是明确板块构造体制转换在华北克拉通的发生时间,需选取不同地区的关键研究对象开展进一步综合地质研究。

绿岩带在世界各太古宙克拉通中均有广泛分布,作为地球特殊演化阶段和特殊构造环境下的产物,是记录地球早期演化的重要物质载体^[9]。大量来自太古宙绿岩带的地质学、岩石学和地球化学研究显示,绿岩带中的火山岩可分为科马提岩-拉斑玄武岩组合与拉斑玄武质-钙碱性玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩组合,前者被认为是地幔柱活动的产物,后者则被认为与汇聚板块边缘洋壳的俯冲作用有关^[9]。因此,绿岩带是探讨太古宙地球动力学机制转换的良好研究对象。位于华北克拉通东部陆块的鲁西地区发育我国最典型的绿岩带,该地区广泛分布的表壳岩系和深成侵入岩同时记录了新太古代早期和晚期的重要构造热事件,是探讨华北克拉通新太古代构造演化及壳幔相互作用的理想地区。本研究对出露于鲁西汞丹山一带杨庄铁矿矿区的柳杭岩组变基性岩开展锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究,确定其形成时代、岩石地球化学特征和形成的构造环境,为探讨鲁西地区乃至华北克拉通的早期地壳演化提供新的地质依据。

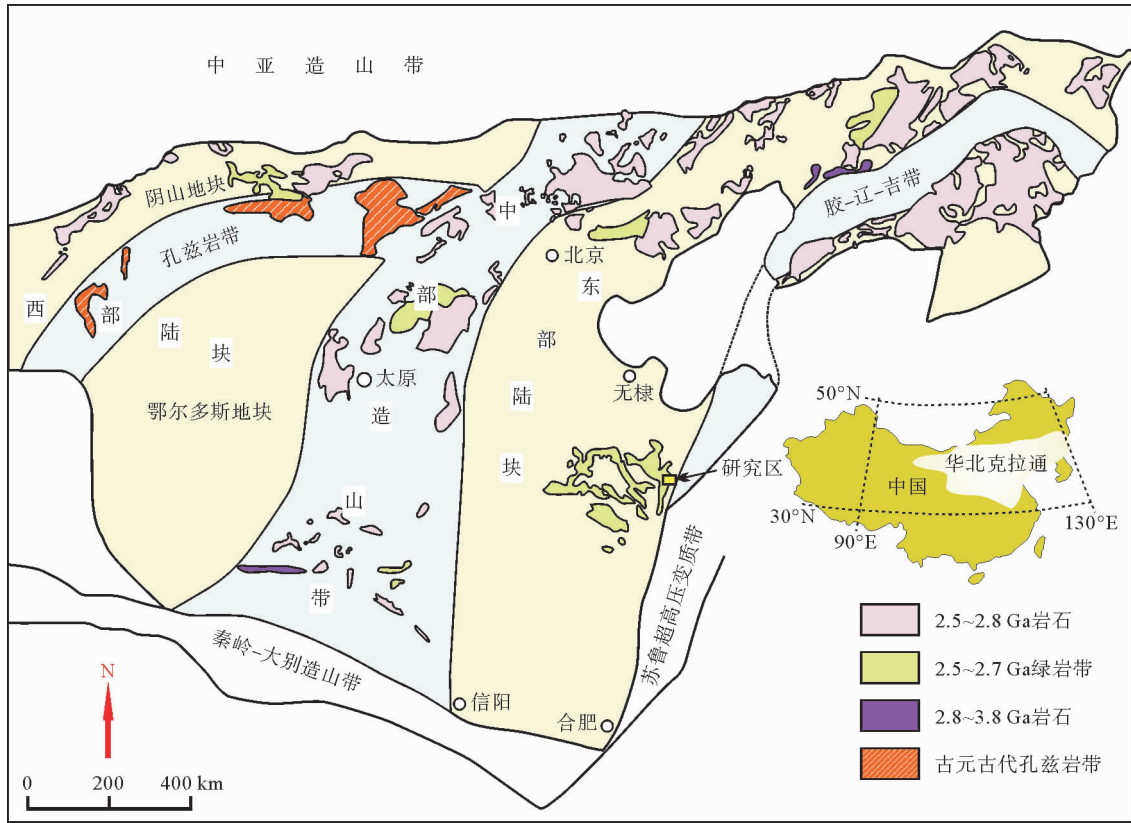


图1 华北克拉通构造单元划分图及研究区位置^[5]

Fig. 1 Tectonic subdivision and location of the North China Craton

1 地质背景及样品描述

鲁西地区位于华北克拉通东南缘,是东部陆块前寒武纪变质基底出露面积最大的区域,其变质基底主要由一系列角闪岩、绿岩、TTG 岩套、麻粒岩、混合岩和表壳岩组成,记录了 2.8~2.4 Ga 期间的多期岩浆事件。其中,以片岩、变质砂岩和变质基性火山岩为主的各类表壳岩多以透镜状或条带状残片的形式存在于各类变质深成侵入岩中,构成沿 NW—NNW 向延伸的绿岩带,部分学者^[10]将其划分为孟家屯岩组、济宁岩群、沂水岩群和泰山岩群。孟家屯岩组出露规模较小,仅在新泰市孟家屯至山头一带可见,是一套 NW—SE 向展布且遭受强烈变形的变质沉积岩系,主要由石榴石英岩、黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩和斜长角闪岩组成^[10]。来自地球物理和钻孔资料的证据显示,济宁岩群主要分布在济宁市北滋阳山一带地表 1 000 m 以下,是一套隐伏的低绿片岩相含条带状铁建造(banded iron formation, BIF)变质岩系,主要由各类板岩、千枚岩和磁铁石英岩组成^[10];沂水岩群主要分布于沂水县东北部郯庐断裂带内,分布零乱且不连续,是一套散布于花岗质岩石中的带状、透镜状或岛状麻粒岩相变质岩系,其原岩主要为镁铁-超镁铁质熔岩、凝灰岩和少量泥质砂岩夹硅质岩^[10];泰山岩群的分布范围最广,可进一步划分为雁翎关岩组、山草峪岩组和柳杭岩组,是一套绿片岩相至角闪岩相变质表壳岩系,主要由变质玄武岩构成,另有少量变质长英质火山-沉积岩系和 BIF^[10]。近年来,许多学者针对鲁西地区前寒武纪基底岩石开展了同位素年代学研究并取得了重大进展^[10-11],部分学者基于这些年代学数据对鲁西表壳岩系的划分方案进行了更新与探讨,其中最为经典的是万渝生等^[10]提出的二分法,即:新太古代早期(2.75~2.70 Ga)表壳岩系(主要包括原泰山岩群中的孟家屯岩组、雁翎关岩组和柳行岩组下段的大部分)和新太古代晚期(2.56~2.525 Ga)表壳岩系(主要包括原济宁岩群和原泰山岩群中的山草峪岩组及柳行岩组上段和下段)。上述变质基底被新元古代土门群页岩、砂岩和碳酸盐岩不整合覆盖^[12]。

研究区位于沂水县东北部的杨庄铁矿(图 2),在大地构造上属于沂沭断裂带的汞丹山隆起,其西侧和东侧分别为马站-苏村凹陷和莒县凹陷。区内发育一条长约 10 km 的 NE 向韧性剪切带,为左行近水平剪切,构造片理产状为 $110^{\circ} \angle 60^{\circ}$ 。发育复杂的脆性断裂构造,为一系列不同规模的 NNE、NE 和 NEE 向断裂。研究区出露的侵入岩形成于古元古代,包括红门超单元和傲徕山超单元,红门超单元的岩体为三官寨中粗粒角闪辉长岩,傲徕山超单元主要为松山单元中细粒二长花岗岩、虎山单元斑状中粗粒二长花岗岩和条花峪中粒含黑云二长花岗岩。矿区出露的地层为泰山岩群柳杭岩组,但多被第四系松散沉积物覆盖。

研究样品采自汞丹山村东北部铁矿矿体的斜长角闪岩,岩石新鲜面呈暗绿色,野外局部露头可见红色石榴子石,岩石宏观上具有较强的面理化特征(图 3(a)),表明遭受过强烈的后期挤压作用。样品为变晶结构(图 3(b)~3(c)),主要由角闪石(65%)和斜长石(25%)组成,另有少量的石榴子石、磁铁矿、锆石等。

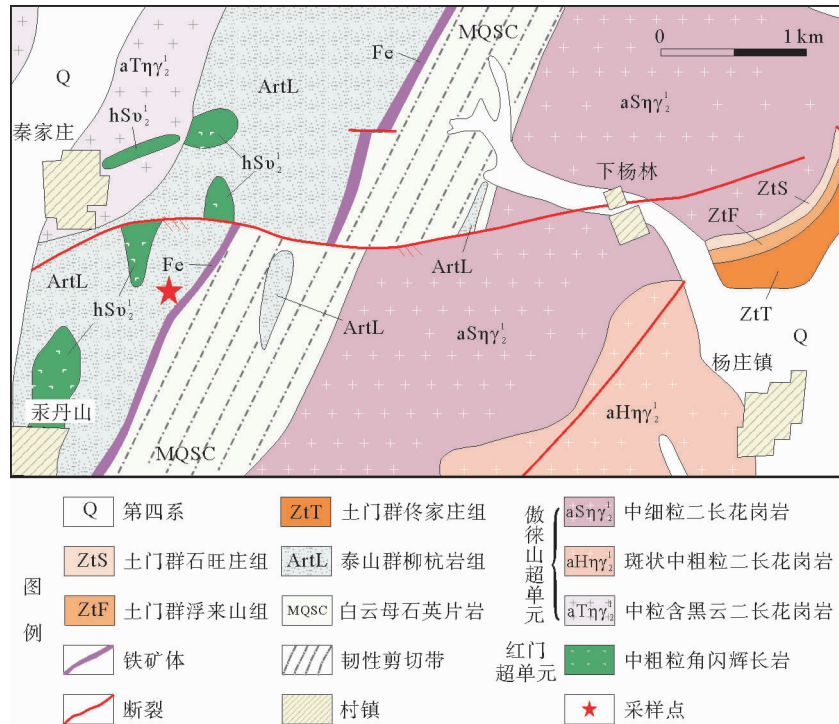


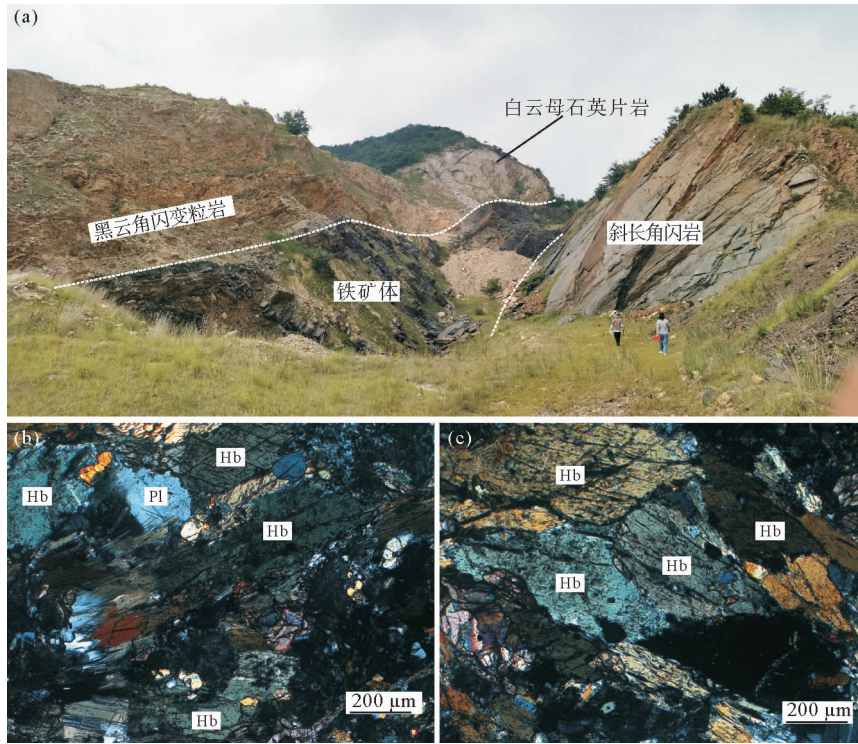
图 2 山东省汞丹山地区地质简图^[13]

Fig. 2 Simplified geologic map of the Gongdanshan area, Shandong Province

2 分析方法

锆石的制靶、抛光和阴极发光(cathodoluminescence, CL)图像的拍摄均在廊坊市地岩矿物分选有限公司完成。锆石 U-Pb 定年测试在山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室完成,测试仪器为激光剥蚀等离子体质谱仪(laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, LA-ICP-MS),由德国 Lambda Physik 公司生产的 GeoLas HD 激光剥蚀系统搭配 Agilent 7900 ICP-MS 八级杆等离子体质谱仪而成。测试过程中激光脉冲频率为 6 Hz,激光束斑直径为 32 μm , U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理采用 91500 和 PLE 分别进行同位素和微量元素分馏校正。原始数据的处理采用 ICPMSDataCal 10.9 程序完成,相关图件的绘制采用 Ispolot 3.0 完成。

全岩主微量元素由武汉上谱分析科技有限责任公司完成。首先将新鲜样品去除表面杂质和风化面,粉碎至 200 目,再采用日本理学(Rigaku)生产的 ZSX Primus II 型波长色散 X 射线荧光光谱仪(X-ray fluorescence, XRF)完成,二价铁和烧失量分别采用重铬酸钾容量法和减重法测得;微量元素分析采用 Agilent 7700e ICP-MS 完成。



(a) 汞丹山斜长角闪岩野外照片; (b)~(c) 斜长角闪岩镜下照片, 正交偏光; Hb—普通角闪石; Pl—斜长石

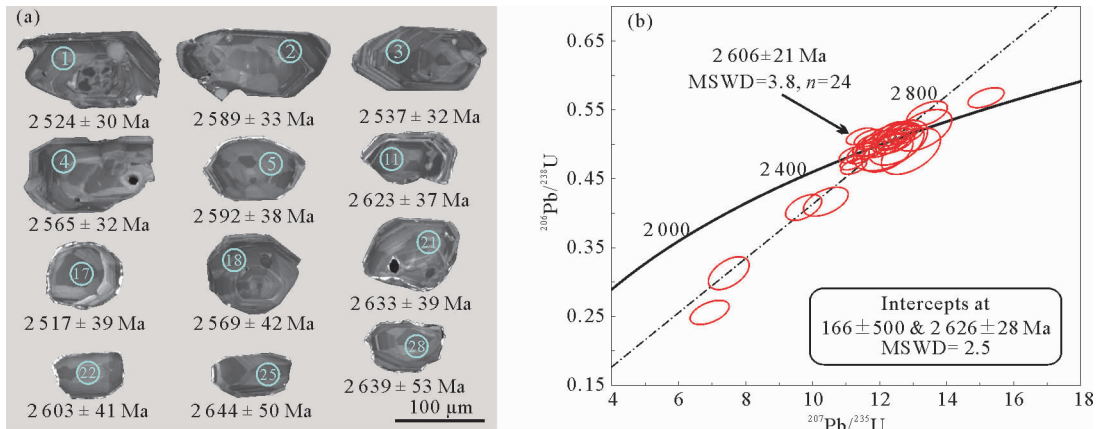
图 3 汞丹山地区斜长角闪岩野外照片及镜下照片

Fig. 3 Field pictures and photomicrographs of the Gongdanshan amphibolite

3 结果

3.1 锆石特征和测年结果

汞丹山斜长角闪岩(样品 GD-1)中的锆石粒径普遍较大,长轴 80~200 μm,长宽比 1~1.5。CL 图像显示(图 4(a)),该样品中个别锆石发育较窄的亮白色变质增生边,大部分锆石发育岩浆生长环带,且环带相对较宽,环带间发光反差不明显,另有部分锆石发育补丁状或扇形分带,上述特点与中基性岩的岩浆锆石结构类似。这一认识与锆石相对较低的 Th($7.30 \times 10^{-6} \sim 44.40 \times 10^{-6}$)和 U($14.75 \times 10^{-6} \sim 62.14 \times 10^{-6}$)含量以及较高的 Th/U 比值(0.40~1.07)一致(表 1)。因此,该锆石应为斜长角闪岩原岩中的岩浆锆石。



(a) 代表性锆石 CL 图像, 圆圈和数字分别代表锆石测点位置和点号; (b) 锆石 U-Pb 年龄谐和图

图 4 汞丹山斜长角闪岩代表性锆石 CL 图像及锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Representative cathodoluminescence (CL) images and concordia diagram of zircon U-Pb ages of the Gongdanshan amphibolite

本次在该样品的 30 颗锆石上进行了 30 个测试点分析, 得到的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,827 \pm 70$ Ma 至 $2\,471 \pm 45$ Ma(表 1), 其中 24 个测点落在谐和线上或附近, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,606 \pm 21$ Ma($n = 24$, $\text{MSWD} = 3.8$)的(图 4(b))。此外, 6 个测点因 Pb 丢失而偏离谐和线, 并沿 Pb 丢失造成了不一致线分布, 上交点年龄为 $2\,626 \pm 28$ Ma($\text{MSWD} = 2.5$), 在误差范围内与上述加权平均年龄一致, 因此该年龄解释为斜长角闪岩原岩的结晶年龄。

表 1 汞丹山斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of the Gongdanshan amphibolite

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
GD-1-01	29.07	37.21	0.78	0.166 6	0.002 9	11.185 2	0.258 7	0.484 8	0.007 8	2 524	30	2 548	34
GD-1-02	14.18	26.69	0.53	0.172 1	0.003 4	11.711 9	0.287 7	0.491 8	0.008 8	2 589	33	2 579	38
GD-1-03	29.08	50.57	0.58	0.167 9	0.003 1	11.690 4	0.234 4	0.503 3	0.007 0	2 537	32	2 628	30
GD-1-04	25.05	44.25	0.57	0.170 6	0.003 4	11.192 0	0.244 0	0.473 8	0.007 2	2 565	32	2 500	32
GD-1-05	12.08	27.64	0.44	0.173 5	0.003 9	11.230 1	0.254 1	0.467 9	0.007 5	2 592	38	2 475	33
GD-1-06	13.25	28.93	0.46	0.178 1	0.003 7	12.752 1	0.283 6	0.517 0	0.008 7	2 635	29	2 687	37
GD-1-07	7.30	14.75	0.49	0.176 3	0.003 7	12.337 5	0.268 9	0.505 0	0.007 7	2 620	35	2 635	33
GD-1-08	8.78	18.67	0.47	0.175 8	0.003 3	12.669 8	0.294 8	0.519 1	0.008 8	2 614	36	2 695	37
GD-1-09	30.15	39.11	0.77	0.192 9	0.004 0	15.177 1	0.356 4	0.567 8	0.009 6	2 769	67	2 899	39
GD-1-10	25.30	56.37	0.45	0.179 3	0.004 1	12.770 4	0.339 4	0.513 6	0.008 6	2 646	38	2 672	37
GD-1-11	28.49	62.14	0.46	0.176 8	0.004 0	12.389 7	0.320 4	0.507 5	0.010 6	2 623	37	2 646	45
GD-1-12	9.66	19.27	0.50	0.172 8	0.003 7	12.388 7	0.295 4	0.518 3	0.009 6	2 585	35	2 692	41
GD-1-13	10.29	22.33	0.46	0.178 6	0.004 9	13.418 6	0.399 2	0.544 6	0.011 9	2 640	45	2 803	50
GD-1-14	21.75	36.74	0.59	0.172 1	0.004 6	9.732 9	0.357 6	0.408 3	0.012 4	2 589	11	2 207	57
GD-1-15	44.40	58.61	0.76	0.170 5	0.004 7	11.691 0	0.325 4	0.495 6	0.008 5	2 563	46	2 595	37
GD-1-16	22.70	24.30	0.93	0.161 5	0.003 9	11.445 5	0.290 9	0.511 6	0.008 0	2 471	45	2 663	34
GD-1-17	36.45	48.08	0.76	0.165 8	0.003 8	11.694 8	0.297 5	0.508 9	0.008 4	2 517	39	2 652	36
GD-1-18	29.87	57.35	0.52	0.171 0	0.004 3	11.460 3	0.290 3	0.486 9	0.009 9	2 569	42	2 557	43
GD-1-19	31.50	29.50	1.07	0.179 0	0.004 8	10.395 2	0.441 6	0.416 7	0.013 9	2 644	44	2 246	63
GD-1-20	15.38	38.38	0.40	0.173 8	0.004 6	12.433 6	0.406 3	0.515 2	0.011 6	2 595	44	2 679	49
GD-1-21	36.14	42.18	0.86	0.176 7	0.004 2	12.398 1	0.404 7	0.507 3	0.014 2	2 633	39	2 645	61
GD-1-22	29.62	42.77	0.69	0.174 7	0.004 8	12.111 5	0.414 1	0.501 4	0.013 3	2 603	41	2 620	57
GD-1-23	16.33	20.14	0.81	0.173 7	0.004 7	7.499 2	0.401 3	0.312 9	0.015 8	2 594	45	1 755	77
GD-1-24	21.09	32.08	0.66	0.181 9	0.005 2	12.232 5	0.504 7	0.487 3	0.018 1	2 672	42	2 559	79
GD-1-25	36.22	39.64	0.91	0.179 1	0.005 3	12.454 2	0.394 7	0.504 9	0.011 9	2 644	50	2 635	51
GD-1-26	40.17	44.75	0.90	0.184 0	0.006 3	12.556 3	0.578 1	0.502 5	0.021 5	2 700	57	2 624	92
GD-1-27	25.63	52.13	0.49	0.186 0	0.004 9	13.296 1	0.567 7	0.520 4	0.019 9	2 707	44	2 701	85
GD-1-28	22.18	28.67	0.77	0.178 5	0.005 8	12.274 8	0.694 4	0.496 9	0.023 3	2 639	53	2 601	100
GD-1-29	19.56	32.47	0.60	0.200 1	0.008 6	12.937 1	0.582 4	0.490 0	0.022 2	2 827	70	2 571	96
GD-1-30	36.25	51.08	0.71	0.199 1	0.008 6	6.927 2	0.384 6	0.255 9	0.011 6	2 820	71	1 469	59

3.2 地球化学特征

对汞丹山地区柳杭岩组的 3 件斜长角闪岩样品(GD-2、GD-3 和 GD-4)进行了全岩主量元素和微量元素

测试,如表2和表3所示。由于研究区柳杭岩组普遍遭受了绿片岩-角闪岩相变质作用,后文与地球化学特征有关的岩石类型、岩石成因及构造背景分析均基于稳定性元素。

表2 汞丹山斜长角闪岩全岩主量元素组成

Table 2 Whole-rock major element compositions of the Gongdanshan amphibolite %

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI	Total
GD-2	52.97	0.70	10.58	9.40	12.60	9.10	9.93	1.28	1.39	0.178	0.21	0.94	99.86
GD-3	54.46	1.03	16.20	14.55	19.30	0.75	1.82	3.91	0.54	0.308	0.04	1.21	99.56
GD-4	49.79	1.18	20.37	11.25	15.06	1.87	2.16	3.57	4.38	0.125	0.06	0.83	99.39

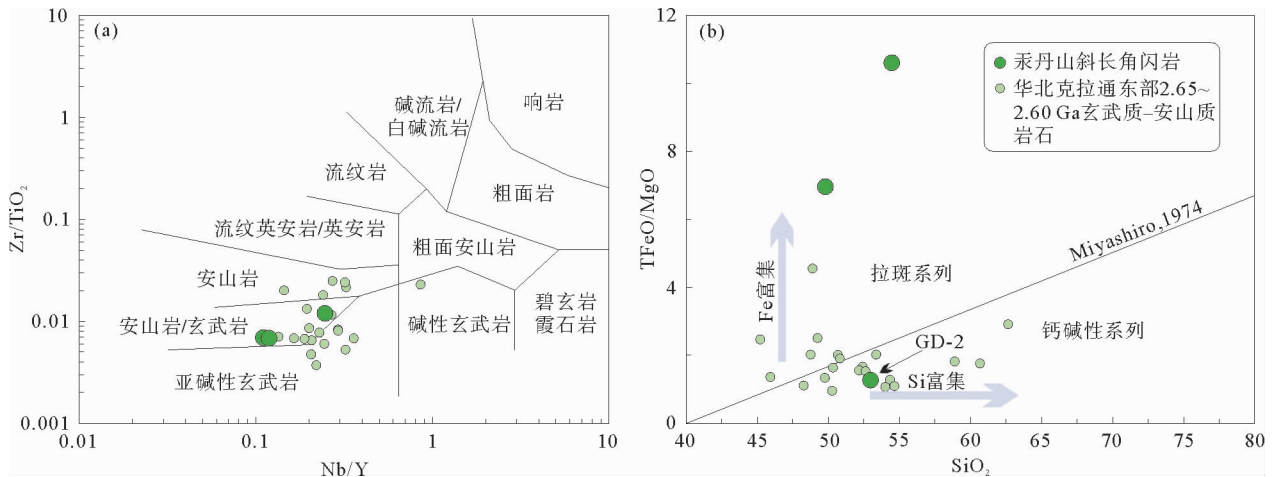
表3 汞丹山斜长角闪岩全岩微量元素组成

Table 3 Whole-rock trace element compositions of the Gongdanshan amphibolite 10⁻⁶

样品	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cs	Ba	La
GD-2	43.90	1.15	32.50	210.00	628.00	46.30	114.00	3.49	84.30	13.70	68.20	419.00	17.20	83.70	4.23	0.83	15.10	423.00	15.60
GD-3	213.00	0.67	38.00	306.00	233.00	59.60	124.00	135.00	105.00	17.80	160.00	91.00	26.20	71.30	2.88	0.98	85.80	413.00	7.54
GD-4	213.00	1.48	29.60	297.00	287.00	73.30	160.00	5.79	103.00	21.10	177.00	830.00	27.60	80.70	3.28	0.82	128.00	468.00	6.05

样品	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Tl	Pb	Th	U
GD-2	33.70	4.19	17.40	3.79	1.07	3.46	0.57	3.09	0.63	1.76	0.25	1.63	0.25	2.30	0.30	0.53	7.95	3.68	1.02
GD-3	17.60	2.47	11.40	3.24	0.83	3.86	0.73	4.37	0.95	2.79	0.39	2.69	0.41	2.07	0.19	1.19	7.07	0.80	0.27
GD-4	14.70	2.08	9.72	2.65	1.46	3.45	0.66	4.41	0.95	2.91	0.39	2.62	0.43	2.40	0.23	1.34	27.8	0.98	0.33

主量元素分析表明,汞丹山斜长角闪岩样品的 SiO₂ 含量 49.79%~54.49%,具有较低的 TiO₂ 含量(0.70%~1.18%)和较高的全铁(TFe₂O₃)含量(12.60%~19.30%),Na₂O 和 K₂O 的含量变化较大,分别为 0.54%~4.38%和 1.28%~3.91%,Al₂O₃ 的含量变化也较大,为 10.58%~20.37%。3 个样品的 CaO 和 MgO 含量差异明显,样品 GD-2 的 CaO 和 MgO 含量明显偏高,分别为 9.10%和 9.93%,而样品 GD-3 和 GD-4 的 CaO 和 MgO 含量较低(CaO 含量分别为 0.75%、1.87%,MgO 含量分别为 1.82%、2.16%)。在 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解中,斜长角闪岩样品均落在安山岩/玄武岩区域(图 5(a)),在 TFeO/MgO-SiO₂ 图解中,样品 GD-2 落入钙碱性系列区域,其余两个样品落入拉斑系列区域(图 5(b))。

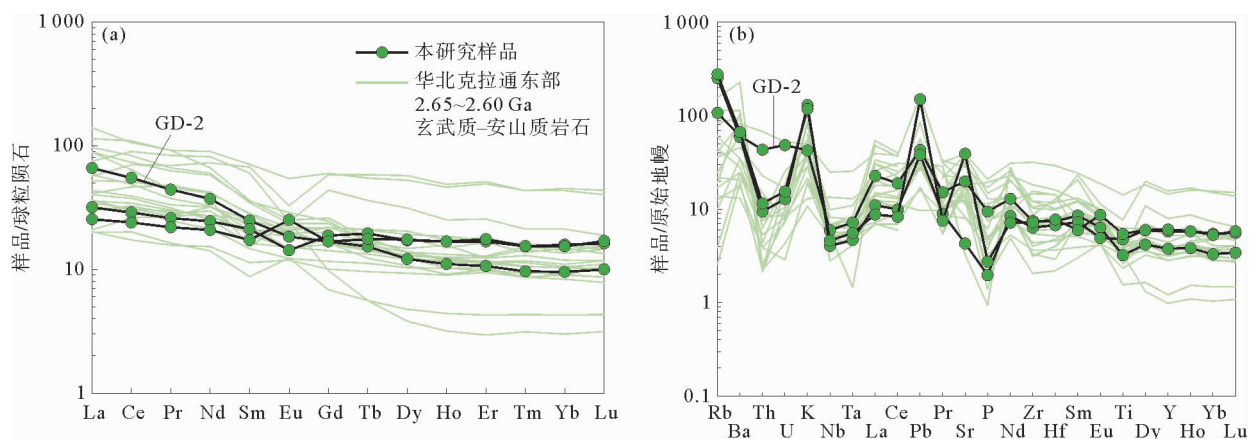


(a) Zr/TiO₂-Nb/Y 图解,底图修改自 Winchester 等^[14]; (b) TFeO/MgO-SiO₂ 图解,拉斑系列与钙碱性系列分界线引自 Miyashiro^[15]; 华北克拉通东部 2.65~2.60 Ga 玄武质-安山质岩石数据引自 Wang 等^[16]

图5 汞丹山斜长角闪岩岩石类型和岩石系列划分图

Fig. 5 Discrimination diagram of rock types and rock series of the Gongdanshan amphibolite

汞丹山斜长角闪岩的稀土元素(rare earth element, REE)总量较低,为 $52.47 \times 10^{-6} \sim 87.43 \times 10^{-6}$, 在球粒陨石标准化 REE 配分模式图中(图 6(a))。样品 GD-2 明显富集轻稀土元素(light rare earth element, LREE), $(La/Yb)_N$ 值为 6.88; 其他 2 个样品则略富集 LREE, $(La/Yb)_N$ 值 1.66~2.01。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 6(b)), 3 个样品均表现出高场强元素(high field strength element, HFSE) Nb、Ta、P、Ti 等负异常。



(a) 球粒陨石标准化 REE 配分模式图; (b) 原始地幔标准化微量元素蛛网图; 球粒原始数据和原始地幔数据引自 Sun and MacDonough^[17]; 华北克拉通东部 2.65~2.60 Ga 玄武质-安山质岩石数据引自 Wang 等^[16]

图 6 汞丹山斜长角闪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. 6 Chondrite-normalized REE partition diagram and primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the Gongdanshan amphibolite

4 讨论

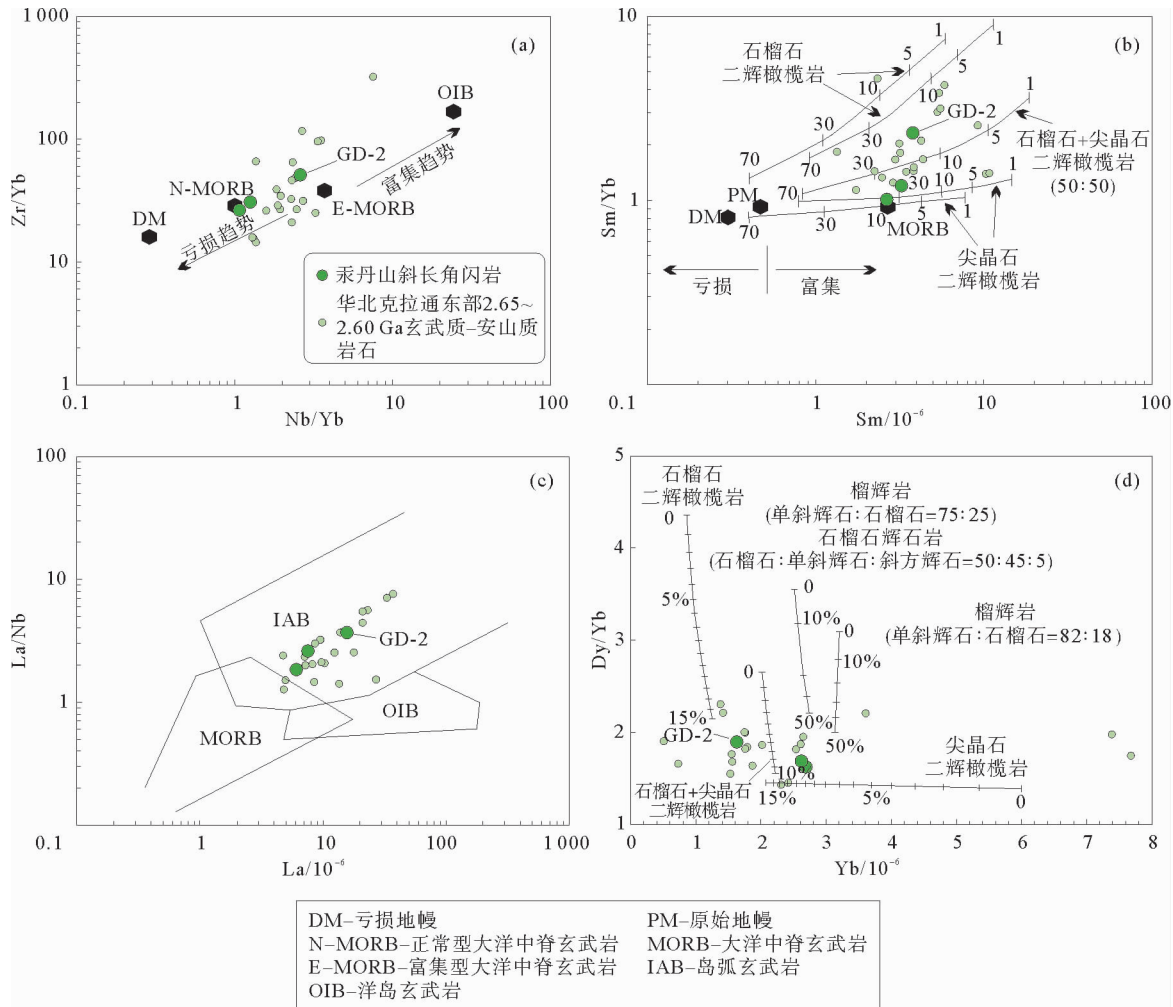
4.1 汞丹山斜长角闪岩原岩的岩石成因

考虑到汞丹山斜长角闪岩遭受了中等程度的变质作用,其原岩的部分地球化学组分可能会在变质作用过程中发生明显的迁移,因此在讨论岩石成因之前有必要评估变质作用对汞丹山斜长角闪岩地球化学组分的影响。Polat 等^[18-19]提出,低的烧失量($LOI < 6\%$)以及明显的 Ce 异常($\delta Ce = 0.82 \sim 1.14$)可以证明岩石的原始化学组分在成岩后蚀变作用或变质作用过程中未经历明显的改变。汞丹山斜长角闪岩的烧失量极低($LOI = 0.83 \sim 1.21$)且无 Ce 异常($\delta Ce = 0.99 \sim 1.01$),表明变质作用对其化学成分的影响很少。此外,在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 6(b)),不同的斜长角闪岩样品具有总体一致的变化趋势(除 Rb 和 Sr 以外),表明稀土元素及大部分微量元素在变质作用过程中保持了较好的稳定性。本研究关于岩石成因的讨论主要基于稀土元素、高场强元素、稳定性相对较高的主量元素(如 Al_2O_3 、 MgO 和 TiO_2 等)以及部分过渡金属元素。

汞丹山斜长角闪岩可分为钙碱性系列和拉斑系列(图 5(b)),其中拉斑系列样品(GD-3 和 GD-4)显示轻微的 LREE 富集(图 6(a)),与富集型大洋中脊玄武岩(enriched mid ocean ridge basalt, E-MORB)类似,然而却以明显的 Nb-Ta 负异常和明显偏低的 Nb 含量($2.88 \times 10^{-6} \sim 3.28 \times 10^{-6}$)区别于 E-MORB($Nb = 8 \times 10^{-6}$)。在 Zr/Yb-Nb/Yb 图解中(图 7(a)),样品落在正常型大洋中脊玄武岩(normal mid ocean ridge basalt, N-MORB)附近并沿亏损趋势线分布,表明其母岩浆可能来源于亏损地幔,两个样品在 Sm/Yb-Sm 图解中同样落在 MORB 附近(图 7(b)),进一步印证了其岩浆源区亏损的性质^[20]。然而,拉斑系列样品明显的 HFSE 亏损表明有俯冲流体/熔体的参与或遭受了地壳混染,而这些样品明显较高的 Cr($233 \times 10^{-6} \sim 287 \times 10^{-6}$)、Co($59.6 \times 10^{-6} \sim 73.3 \times 10^{-6}$)和 Ni($124 \times 10^{-6} \sim 160 \times 10^{-6}$)含量以及缺乏 Zr-Hf 的正异常排除了地壳混染的可能性^[21],其较低的 Nb/La 比值(0.38~0.54)与岛弧相关玄武质岩石($Nb/La < 0.85$)一致,且

在 La/Nb-La 图解中落在岛弧拉斑玄武岩附近(图 7(c))。因此,汞丹山拉斑系列样品母岩浆的形成过程有俯冲流体/熔体的参与。在 Sm/Yb-Sm 图解中(图 7(b)),拉斑系列样品落在尖晶石二辉橄榄岩熔点曲线及其附近,在 Dy/Yb-Yb 图解中(图 7(d)),显示尖晶石二辉橄榄岩为 10%~15%部分熔融的产物。样品相对较低的(La/Yb)_N 值(1.66~2.01)指示了岩浆源区有少量石榴子石残余,明显亏损 HFSE 以及较低的(Zr/Sm)_N 值(0.87~1.20)表明部分熔融过程中有单斜辉石的参与^[22]。

与拉斑系列样品相比,汞丹山钙碱性样品(GD-2)具有明显的 LREE 富集和高场强元素(Nb、Ta、P、Ti)亏损特征,其较低的 TiO₂(0.70%)和较高的 MgO(9.93%)含量与太古宙硅质高镁玄武岩(siliceous high-Mg basalt, SHMB)的地球化学特征一致^[22]。对于 SHMB 的成因主要存在以下两种认识^[21]:①由科马提质岩浆通过同化混染+分离结晶(assimilation and fractional crystallization, AFC)形成;②与玻安岩的成因相似,由俯冲板片含水熔体/流体/沉积物对岩石圈地幔部分熔融产物的交代形成。就汞丹山斜长角闪岩而言,研究区乃至整个鲁西地区均未发现与之同时代的科马提岩,目前仅在蒙阴地区识别出>2.7 Ga 的科马提岩。此外,该样品具有明显偏高的 Mg[#](58)、MgO(9.93%)、Cr(628×10⁻⁶)、Co(46.3×10⁻⁶)和 Ni(114×10⁻⁶)含量,且不存在明显的 Zr-Hf 正异常,可排除地壳混染的可能^[21]。因此,汞丹山钙碱性高镁斜长角闪岩的原岩不可能是科马提质岩浆经历 AFC 形成的。该样品具有较高的 LREE 和大离子亲石元素(large ion



(a) Zr/Yb-Nb/Yb 图解,底图修改自 Guo 等^[20]; (b) Sm/Yb-Sm 图解,底图修改自 Aldanmaz 等^[25]; (c) La/Nb-La 图解,底图修改自李婷^[6]; (d) Dy/Yb-Yb 图解,底图修改自 An 等^[26]; 华北克拉通东部 2.65~2.60 Ga 玄武质-安山质岩石数据引自 Wang 等^[16]

图 7 汞丹山斜长角闪岩地球化学判别图

Fig. 7 Geochemical discrimination diagrams for the Gongdanshan amphibolite

lithophile element, LILE)以及中等的 $(La/Sm)_N$ 和偏低的 $(Nb/La)_{PM}$,且具有明显的 HFSE 负异常(图 6(b)),表明该样品原岩的母岩浆可能来自俯冲板片流体或含水熔体交代的地幔楔的部分熔融^[23],该样品在 La/Nb-La 图解中落入岛弧玄武岩(island arc basalt, IAB)区域(图 7(c)),表明母岩浆的形成发生在洋内俯冲环境,进一步证实了这一推测。与拉斑系列样品相比,钙碱性样品具有更高的 Nb/Y 值(0.25)和更低的 Al_2O_3 含量(10.58%),表明其母岩浆形成于相对更浅条件下的地幔物质经历更高程度的部分熔融^[24]。在 Sm/Yb-Sm 图解中(图 7(b)),钙碱性样品落在石榴石二辉橄榄岩和含尖晶石石榴石二辉橄榄岩的熔点曲线之间,在 Dy/Yb-Yb 图解中(图 7(d)),显示为石榴石二辉橄榄岩 15%~20%部分熔融的产物。该样品较高的 $(La/Yb)_N$ 值(6.88)指示了岩浆源区石榴子石的残余,明显亏损的 HFSE 以及较低的 $(Zr/Sm)_N$ 值(0.87)表明部分熔融过程有单斜辉石的参与^[22]。

4.2 构造意义

目前对于鲁西地区新太古代晚期的构造演化存在不同的认识,部分学者根据逆时针变质 $P-T-t$ 轨迹的麻粒岩相变质作用的存在,提出了地幔柱模式^[27],另一部分学者则根据弧岩浆岩组合的存在及其弧岩浆岩地球化学特征,提出了板片俯冲模式^[21]。然而,实际上逆时针变质 $P-T-t$ 轨迹不仅可以出现在地幔柱环境,还可以出现在初始裂谷以及陆内弧或板片回卷等不同构造环境下^[28]。此外,位于研究区附近的沂水杂岩作为华北克拉通花岗-绿岩带的重要组成部分,记录了约 100 Ma 的连续岩浆作用,这与地幔柱模式下的岩浆作用持续时间(往往少于 3 Ma)不一致^[21]。再者,地幔柱成因的岩浆岩组合往往以具有洋岛玄武岩(ocean island basalt, OIB)特征的基性-超基性岩为主,而鲁西地区存在大量的新太古代晚期长英质侵入岩,不符合地幔柱成因的特征^[21]。

如前所述,汞丹山斜长角闪岩明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素,且在 La/Nb-La 图解中均落入 IAB 区域,指示了鲁西地区 2.63 Ga 俯冲作用的存在。这一认识也得到了杨庄一带和南小尧一带沂水杂岩中角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩的年代学和地球化学特征的支持^[21],锆石 U-Pb 测年表明沂水杂岩变质岩的原岩年龄为 2.641 ± 8 Ma,地球化学特征表明其原岩为高镁安山岩,是俯冲流体或熔体交代地幔楔部分熔融的产物,形成于上地幔相对较浅的部位^[21]。尽管华北克拉通 2.65~2.60 Ga 的岩浆岩并不多见,但在不同地区均有少量分布,且普遍表现出俯冲作用的地球化学特征(图 7(c))。如冀东西河桥-青龙一带的斜长角闪岩原岩年龄为 2.61 Ga,具有拉斑玄武岩的特征,存在明显的 Nb-Ta 负异常以及轻微右倾的 REE 分配模式,显示出岛弧相关属性^[20];吉林南部的和龙花岗-绿岩带中斜长角闪岩原岩年龄为 2.65 Ga,具有明显的 Nb、Ta、Ti 负异常,表现出岛弧拉斑玄武岩的典型特征^[16]。上述证据表明华北克拉通在 2.65~2.60 Ga 期间可能存在大规模俯冲作用。Bleeker^[28]对世界上 35 处太古宙克拉通进行了详细研究,并划分为 Kaapvaal 型、Superior 型和 Slave 型 3 大类,克拉通化分别发生在 3.0 Ga、2.68 Ga 和 2.58 Ga。克拉通化之后进入造山后伸展演化阶段,形成常分布在绿岩带顶部的河流冲积物和沉积物。造山后的岩石圈伸展将会导致克拉通边缘岩石圈的压缩和汇聚,以保持全球岩石圈的质量和力矩平衡^[16]。这一广泛的地质作用被认为是华北克拉通 2.65~2.60 Ga 期间区域性压缩的动力来源,并导致了沿古老陆核周缘的大洋俯冲作用^[16]。鲁西地区汞丹山变基性岩的原岩以及前述华北克拉通其他地区存在的 2.65~2.60 Ga 玄武质-安山质岩浆岩均为该时期俯冲作用下的产物。然而需要注意的是,研究区的 3 个样品虽取自较小的尺度范围内,却具有差异明显的地球化学特征,且具有不同的岩石成因,推测可能是俯冲过程中形成于不同部位的岩石在成岩后构造运动中被混杂在一起而成,但尚需进一步构造地质学以及更详细的地球化学和地质年代学证据的支持。

5 结论

通过对山东汞丹山一带杨庄铁矿区内柳杭岩组变基性岩进行年代学和地球化学分析,对其原岩年龄、岩石成因以及大地构造背景进行约束,结合前人针对华北克拉通晚太古代构造演化的研究结果,得到了以下认识。

- 1) 汞丹山变基性岩(斜长角闪岩)的原岩结晶年龄为 2.626 ± 28 Ma,为新太古代晚期的岩浆产物。
- 2) 汞丹山变基性岩的原岩为玄武岩/安山岩,可分为拉斑系列和钙碱性系列。拉斑系列样品的母岩浆

可能来源于亏损地幔,且形成过程有俯冲流体/熔体的参与;钙碱性样品具有太古宙硅质高镁玄武岩的地球化学特征,是俯冲板片流体或含水熔体交代的地幔楔部分熔融的产物,但其形成条件相对更浅且经历的部分熔融程度更高。

3) 汞丹山斜长角闪岩与华北克拉通已识别出的一系列新太古代晚期玄武质-安山质岩浆岩均明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素,与岛弧玄武岩的特征一致,表明华北克拉通在新太古代晚期经历了大规模俯冲作用。

参考文献:

- [1] DHUIME B, WUESTEFELD A, HAWKESWORTH C J. Emergence of modern continental crust about 3 billion years ago [J/OL]. *Nature Geoscience*, 2015. DOI: 10.1038/NGEO2466.
- [2] FURNES H, DE WIT M, STAUDIGEL H, et al. A vestige of Earth's oldest ophiolite [J]. *Science*, 2007, 315: 1704-1707.
- [3] TAPPE S, SMART K A, PEARSON D G, et al. Craton formation in Late Archean subduction zones revealed by first Greenland eclogites [J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1103-1106.
- [4] HASTIE A R, FITTON J G, BROMILEY G D, et al. The origin of Earth's first continents and the onset of plate tectonics [J]. *Geology*, 2016, 44(10): 855-858.
- [5] ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 2005, 136: 177-202.
- [6] 李婷. 鲁西新太古代早期变火山岩的地球化学特征及意义 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019: 30-31.
LI Ting. Geochemical characteristics and significance of the early Neoproterozoic metamorphic rocks in Western Shandong Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019: 30-31.
- [7] GENG Y S, DU L L, REN L D. Growth and reworking of the early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes [J]. *Gondwana Research*, 2012, 21: 517-529.
- [8] NUTMAN A P, WAN Y S, DU L L, et al. Multistage late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei [J]. *Precambrian Research*, 2011, 189: 43-65.
- [9] NEBEL O, CAMPBELL I H, SOSSI P A, et al. Hafnium and iron isotopes in early Archean komatiites record a plume-driven convection cycle in the Hadean Earth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 397: 111-120.
- [10] 万渝生, 董春艳, 顿颖强, 等. 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期(2.6~3.0 Ga) 巨量陆壳增生: 综述 [J]. *地质力学学报*, 2022, 28(5): 866-906.
WAN Yusheng, DONG Chunyan, XIE Hangqiang, et al. Huge growth of the late Mesoproterozoic-early Neoproterozoic (2.6~3.0 Ga) continental crust in the North China Craton: A review [J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(5): 866-906.
- [11] SUN G Z, LIU S W, GAO L, et al. Origin of late Neoproterozoic granitoid diversity in the Western Shandong province, North China Craton [J/OL]. *Precambrian Research*, 2020, 339. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105620.
- [12] 韩作振, 刘凯旋, 任祥, 等. 鲁西寒武系凝块石蕊类生物标志物特征 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(3): 1-12.
HAN Zuozhen, LIU Kaixuan, REN Xiang, et al. Characteristics of hopane biomarkers of thrombolites in Cambrian, Shandong province [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 39(3): 1-12.
- [13] 赖小东, 杨晓勇. 鲁西杨庄条带状铁建造特征及锆石年代学研究 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3612-3622.
LAI Xiaodong, YANG Xiaoyong. Characteristics of the banded iron formation (BIF) and its zircon chronology in Yangzhuang, western Shandong [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11): 3612-3622.
- [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: 321-355.
- [16] WANG X, ZHU W B, ZHENG Y F. Geochemical constraints on the nature of Late Archean basaltic-andesitic magmatism in the North China Craton [J/OL]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 230. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104065.
- [17] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C] // SAUNDERS A D, NORRIS M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society, 1989.

- 42:313-345.
- [18] POLAT A, HOFMANN A W, ROSING M T. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7~3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland; Geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth[J]. *Chemical Geology*, 2002, 184: 231-254.
- [19] POLAT A, HOFMANN A W. Alteration and geochemical patterns in the 3.7~3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland[J]. *Precambrian Research*, 2003, 126: 197-218.
- [20] GUO R R, LIU S W, BAI X, et al. A Neoproterozoic subduction recorded by the Eastern Hebei Precambrian basement, North China Craton; Geochemical fingerprints from metavolcanic rocks of the Saheqiao-Shangying-Qinglong supracrustal belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 135: 347-369.
- [21] GAO L, LIU S W, SUN G Z, et al. Neoproterozoic crust-mantle interactions in the Yishui Terrane, south-eastern margin of the North China Craton; Constraints from geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes of metavolcanic rocks and high-K granitoids[J]. *Gondwana Research*, 2019, 65: 97-124.
- [22] PENG T P, WILDE S A, FAN W M, et al. Neoproterozoic siliceous high-Mg basalt (SHMB) from the Taishan granite-greenstone terrane, Eastern North China Craton; Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 2013, 228: 233-249.
- [23] 李继磊. 俯冲带变质脱水作用与流体性质[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(5): 23-29.
LI Jilei. Metamorphic dehydrations and fluid nature in subduction zones[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 40(5): 23-29.
- [24] POLAT A. The geochemistry of Neoproterozoic (ca. 2 700 Ma) tholeiitic basalts, transitional to alkaline basalts, and gabbros, Wawa Subprovince, Canada; Implications for petrogenetic and geodynamic processes[J]. *Precambrian Research*, 2009, 168: 83-105.
- [25] 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.
- [26] AN A R, CHOI S H, YU Y, et al. Petrogenesis of Late Cenozoic basaltic rocks from southern Vietnam[J]. *Lithos*, 2017, 272/273: 192-204.
- [27] WU M L, ZHAO G C, SUN M, et al. Petrology and P-T path of the Yishui mafic granulites; Implications for tectonothermal evolution of the Western Shandong Complex in the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 312-324.
- [28] BLEEKER W. The late Archean record; A puzzle in ca. 35 pieces[J]. *Lithos*, 2003, 71: 99-134.

(责任编辑:高丽华)