

辽宁昌图地区下二台群盘岭组火山岩年代学 及地球化学特征

韩作振^{1,2}, 郭志平^{1,2}, 高丽华^{1,2}, 宋志刚^{1,2}, 韩梅^{1,2}, 刘固耀³, 钟文健^{1,2}, 李晶晶^{1,2}, 闫俊磊^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 铜陵有色股份天马山黄金矿业有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 本文对昌图地区下二台群盘岭组变质火山岩进行了年代学和地球化学分析。盘岭组角闪变粒岩中锆石阴极发光图像显示, 锆石呈半自形晶-自形晶, 发育晶棱和清晰的岩浆振荡环带, 且具有较高的 Th/U 比值(0.31~2.5), 表明其为岩浆成因。LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示, 27 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $348 \pm 4.4 \text{ Ma}$, 代表了角闪变粒岩原岩的形成时代。角闪变粒岩 SiO_2 含量为 54.01%, 全铁(TFe_2O_3) 含量为 15.04%, $\text{Mg}^\#$ 值为 33.29, 属于亚碱性拉斑玄武岩系列。岩石地球化学分析表明, 角闪变粒岩相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损重稀土元素和高场强元素, 具有活动大陆边缘火山岩的特征。通过 Hf/3-Th-Nb/16、Hf/3-Th-Ta 等图解投点分析, 结合区域构造演化历史, 认为角闪变粒岩原岩形成于活动大陆边缘。因此, 推断华北板块北缘东段早石炭世为活动大陆边缘, 并受到古亚洲洋板块的俯冲作用。

关键词: 盘岭组; 角闪变粒岩; U-Pb 锆石定年; 活动大陆边缘; 古亚洲洋

中图分类号: P588.14

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)05-0001-08

Geochronology and Geochemistry Characteristics of Volcanic Rocks from Panling Formation of Xiaertai Group in Changtu Area, Liaoning Province

HAN Zuozhen^{1,2}, GUO Zhiping^{1,2}, GAO Lihua^{1,2}, SONG Zhigang^{1,2}, HAN Mei^{1,2},
LIU Guyao³, ZHONG Wenjian^{1,2}, LI Jingjing^{1,2}, YAN Junlei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Mineral of Shandong Province, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Tongling Nonferrous Shares Tianmashan Gold Mining Co. Ltd, Tongling, Anhui 244000, China)

Abstract: This paper analyzed the geochronology and geochemistry features of metavolcanic rocks from Panling formation of Xiaertai Group in Changtu area. The CL images of zircons from the Amphibolite leptite of Panling formation show that the zircons are magmatic zircons with euhedral-subhedral crystals, typical magma concussion growth zoning and crystal prism, and a high Th/U(0.31~2.5). LA-ICPMS U-Pb dating results indicate that the weighted average age of 27 measuring points of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ is $348 \pm 4.4 \text{ Ma}$, which represents the forming age of the volcanic rocks. With 54.01% SiO_2 , 15.04% TFe_2O_3 and 33.29 $\text{Mg}^\#$, the amphibolite leptite belongs to Sub-alkali tholeiitic series. The litho-geochemical analysis shows that this sample has relatively enriched LILEs and LREEs and depleted HREEs and HSFES, displaying characteristics of volcanic rocks of active continental margin. The figures of Hf/3-

收稿日期: 2016-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372108); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20133718130001)

作者简介: 韩作振(1965—), 男, 河南新乡人, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积地层学方面的研究. E-mail: hanzz@163.com

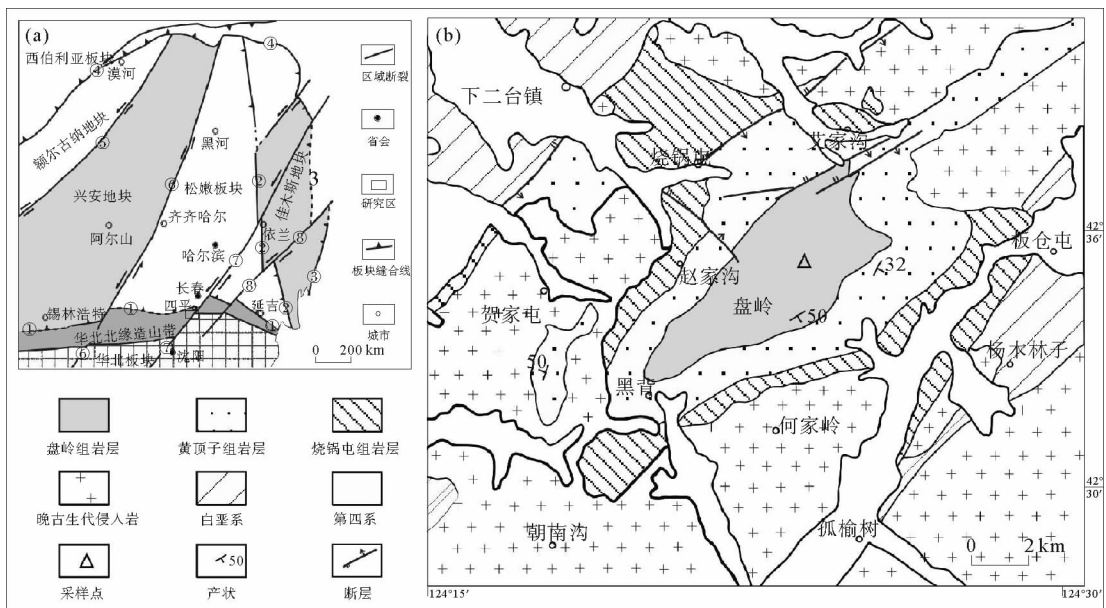
Th-Nb/16, Hf/3-Th-Ta, together with the history of regional tectonic evolution, shows that the formation environment of the amphibolite leptite should be active continental margin. It is concluded that the eastern section of the northern margin of the North China Plate was active continental margin in Early Carboniferous epoch and was subducted by the Paleo-Asian ocean plate.

Key words: Panling formation; amphibolite leptite; U-Pb zircon dating; active continental margin; the Paleo-Asian ocean

昌图地区位于辽宁省北部,大地构造位置位于华北板块北缘东段(图 1(a))。华北板块北缘东段是古亚洲洋南支洋闭合后,华北板块与东北联合地块碰撞形成的增生型造山带。对于华北板块和东北联合地块的碰撞时间、地点及方式,仍存在较大分歧^[1-3]。关于古亚洲洋南支洋的沉积和构造演化主要有以下两种观点:①晚奥陶世—志留纪或中志留世末期—晚志留世早期,华北板块与西伯利亚板块对接,后期演化为泥盆纪和石炭纪裂陷槽^[4];②早古生代志留纪—早石炭世可能属于被动大陆边缘^[5],中石炭世—中二叠世转化为安第斯型活动大陆边缘^[6],晚二叠世—早三叠世古亚洲洋南支洋沿西拉木伦河—长春—延吉缝合带闭合^[7-9]。对于华北板块北缘的构造属性仍存在活动大陆边缘和被动大陆边缘两种认识。

华北板块北缘东段的古生代地层残缺不全,野外露头较少,岩石遭受了强烈的变质和变形作用,同时也缺乏精确的年代学和岩石地球化学研究^[9]。前人对于昌图地区的研究工作较少,部分学者对昌图地区下二台群进行了沉积建造、构造变形等方面研究,但对其形成时代仍有较大争议。前人将下二台群的形成时代多置于寒武—石炭纪^[9-13],但对其形成的构造背景存在不同认识。鉴于此,本文对辽宁昌图下二台群盘岭组变质火山岩进行了锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究,分析盘岭组变质火山岩原岩的形成时代及其形成时的构造环境,为探讨晚古生代古亚洲洋南支洋的构造演化提供新的佐证。

1 地质背景与样品描述



①西拉木伦河—长春—延吉缝合带,②牡丹江缝合带,③同江—月季山缝合带,④蒙古—鄂霍茨克缝合带,⑤德尔布干断裂,⑥嫩江—开鲁断裂,⑦佳木斯—伊通断裂,⑧敦化—密山断裂

图 1 中国东北构造单元及昌图盘岭地区地质简图(图(a)据周建波(2009)修改;图(b)据辽宁省地质局区域地质测量队 1:20 万四平幅地质图修改)

Fig. 1 Tectonic units of northeast China and geological map of Panling area, Changtu (Fig(a) modified from Zhou Jianbo, 2009; Fig(b) modified from 1:200 000 geological map of Siping roll by regional geological survey team of Liaoning geological bureau)

研究区位于辽宁省昌图县下二台镇盘岭一带(图 1(b)),大地构造位置属于华北板块北缘东段。辽宁区调队 1969—1971 年进行 1:20 万区域地质调查时,将出露于下二台镇附近的一套变质岩系命名为下二台群^[11],自下而上将其划分为盘岭组、黄顶子组和烧锅屯组,时代置于奥陶—志留纪^[13]。下二台群盘岭组以变质英安岩、二云石英片岩、石英绿帘石岩以及斜长角闪岩为主;黄顶子组以条纹状大理岩、浅粒岩及黑云变粒岩为主,与盘岭组整合接触;烧锅屯组下部以片岩为主夹变粒岩,中上部为变粒岩夹片岩、浅粒岩,与黄顶子组呈不整合接触^[13]。

盘岭组岩石样品采自下二台乡盘岭鞍部,采样岩层为厚层状与薄层状角闪变粒岩互层(图 2(a),2(b))。结合野外观察和显微镜下鉴定,将样品定名为角闪变粒岩。角闪变粒岩显示粒状变晶结构,石英和长石含量 65%~70%,呈粒状变晶,变晶粒度 0.05~0.15 mm 不等;角闪石和黑云母含量 25%~30%,呈柱粒状、粒状变晶,变晶粒度 0.1~0.5 mm 不等,其中黑云母呈片状不均匀分布于岩石中;岩石中见 2%~3%(占薄片表面积含量)不透明矿物呈稀疏浸染状及脉状分布,副矿物有楣石和磷灰石等(图 2(c),2(d))。

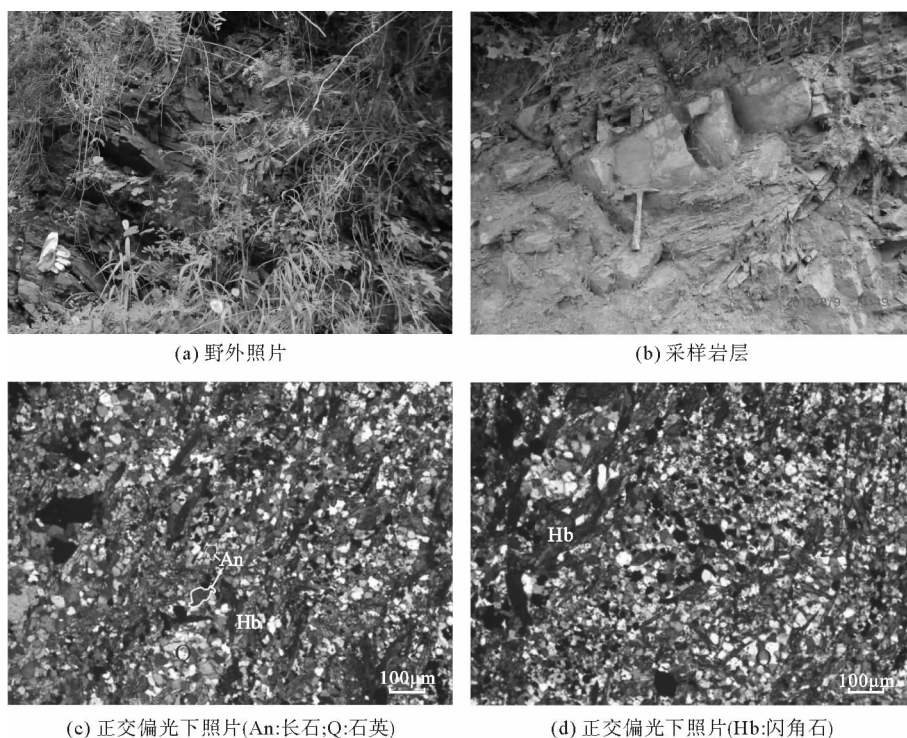


图 2 研究区野外照片和镜下照片

Fig. 2 Outcrops and microphotographs of research area

2 分析结果

样品锆石挑选工作在河北省廊坊市区域地质矿产调查研究所完成。样品的锆石制靶、阴极发光图像(CL 图像)采集、锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年以及样品主微量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,实验过程详见文献[14-15]。

2.1 锆石 U-Pb 年龄

盘岭组角闪变粒岩部分锆石阴极(CL)发光图像见图 3,U-Pb 年龄谐和图见图 4。下二台群盘岭组角闪变粒岩的锆石 CL 图像显示,锆石呈半自形-自形晶,内部结构清晰,可见典型的岩浆震荡环带,晶棱发育。其 Th/U 比值 0.31~2.5(表 1),显示岩浆锆石成因。位于谐和线上及其附近的 27 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 329±5~372±5 Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 348±4.4 Ma(MSWD=4.0,n=27),说明盘岭组角闪变粒岩原岩的形成时代为早石炭世(图 4)。

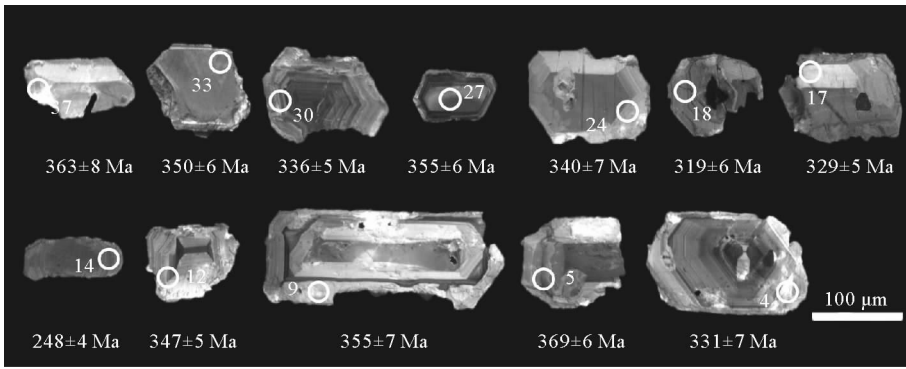


图 3 盘岭组角闪变粒岩锆石的阴极发光图像

Fig. 3 CL images of selected zircons of the amphibolite leptite of Panling area

2.2 主微量元素

下二台群盘岭组角闪变粒岩主微量元素含量分析结果见表 1。

由于样品遭受了较强的变质作用,因此应先对样品进行原岩恢复。在 A-K 图解中(图 5),角闪变粒岩落在火成岩区域内,结合样品中锆石的形态、高的 Th/U 值以及副矿物中榍石和磷灰石的存在,表明其原岩为火山岩。

表 1 盘岭组角闪变粒岩主量元素(%)和微量元素(μg/g)

Tab. 2 Major(%) and trace element(ppm) data of the amphibolite leptite of Panling area

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL
54.01	1.91	14.58	5.23	9.23	15.04	0.29	3.79	7.99	3.98	0.55	0.64	0.54	102.74
Cr	Ni	Sc	Co	V	Cu	Zn	Ga	Ba	Rb	Th	U	Nb	Ta
13.18	9.71	37.66	32.36	254.30	20.20	157.40	13.12	125.80	7.33	2.74	0.76	6.64	0.50
Sr	Zr	Hf	Y	Pb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
412.00	31.80	1.80	61.69	16.98	19.60	44.11	6.11	27.78	7.14	2.02	6.49	1.45	10.27
Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe	A/CNK	A/NK	
2.14	6.33	1.01	6.19	0.94	141.58	106.76	34.82	2.13	0.89	0.96	1.164	3.21	

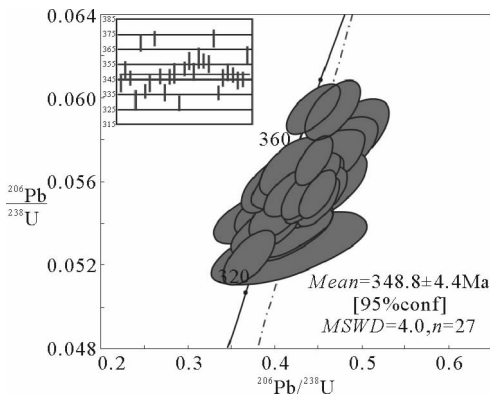


图 4 盘岭组角闪变粒岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图
Fig. 4 Concordia diagram showing LA-ICP-MS zircon U-Pb dating date of the amphibolite leptite of Panling area

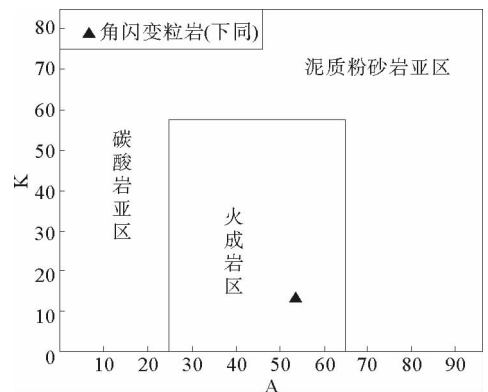


图 5 盘岭组角闪变粒岩 A-K 图解(据周世泰,1981)
Fig. 5 A-K diagram of the amphibolite leptite of Panling area(modified from Zhou Shitai,1981)

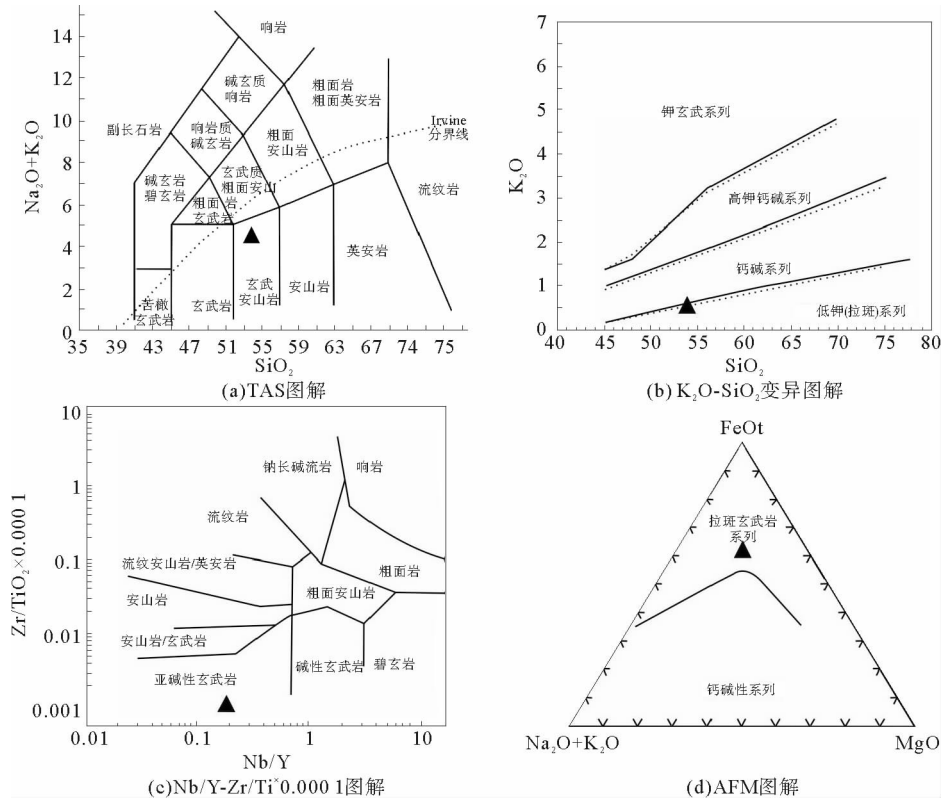


图 6 盘岭组火山岩分类图解

Fig. 6 Volcanic categories graphic of Panling area

主量元素特征:盘岭组角闪变粒岩 SiO_2 含量 54.01%, Al_2O_3 含量较高 14.58%, 铝饱和指数 A/CNK 为 0.67, TiO_2 含量 1.91%, $\text{Mg}^\#$ 值为 33.29 ($\text{Mg}^\# = 100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+ \text{ tot}})$), 全铁 ($^T\text{Fe}_2\text{O}_3$) 含量为 15.04%。该样品具有富钠($\text{Na}_2\text{O}=3.98\%$)低钾($\text{K}_2\text{O}=0.55\%$)特点, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 7.24, 在 TAS 图解中样品落在玄武安山岩区域内(图 6(a)); 在 SiO_2 - K_2O 变异图中, 该岩石显示低钾(拉斑)系列(图 6(b)); 在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$ vs Nb/Y 图解中样品落入亚碱性玄武岩区域内(图 6(c)); 在 AFM 图解中样品落在拉斑玄武岩系列(图 6(d))。上述图解表明, 研究区变质火山岩属于亚碱性系列, 其原岩应为玄武岩。

微量元素特征:样品的稀土元素球粒陨石标准化图解显示(图7(a)), 盘岭组角闪变粒岩具有右倾形稀

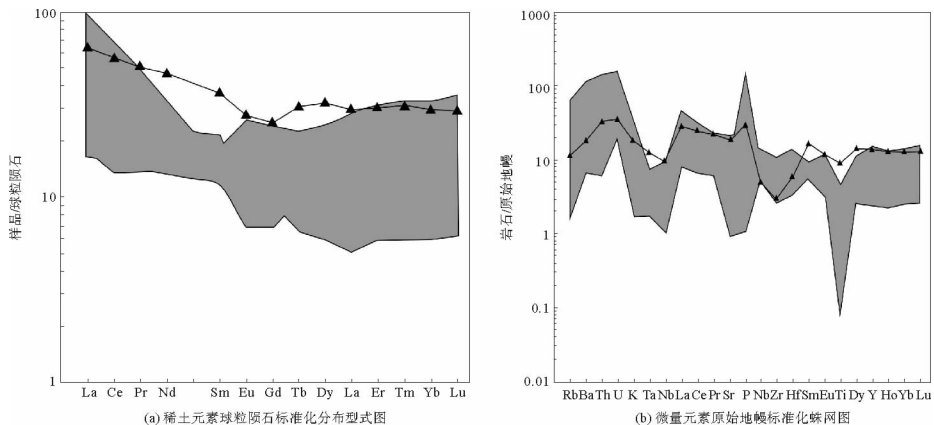


图 7 盘岭组角闪变粒岩微量元素图解(图(a)标准化值据 Boynton,1984;图(b)标准化值据 Sun and Mc Donough,1989;图中阴影区据王挽琼,2014)

Fig. 7 Trace element diagram of the amphibolite leptite from Panling formation (Fig(a) Normalized value modified from Boynton, 1984; Fig(b) Normalized value modified from Sun and Mc Donough, 1989; Shaded area modified from Wang Wanqiong, 2014)

土元素配分型式,稀土元素总量(ΣREE) $141.58 \mu\text{g/g}$,轻稀土元素(LREEs)总量 $106.76 \mu\text{g/g}$,重稀土元素(HREEs)总量 $34.82 \mu\text{g/g}$,LREE/HREE 比值 3.07,(La/Yb)_N 比值 2.13,显示轻重稀土元素分馏明显,富集 LREEs、亏损 HREEs,同时显示微弱的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.89$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 7(b)),角闪变粒岩相对富集大离子亲石元素(LILEs,Rb、Ba、Th、U、K 等),亏损高场强元素(HFSEs,Nb、Ta、P 等),微量元素所表现出的总体特点与华北板块北缘中段温都尔庙-集宁一带石炭纪火成岩类似^[17](图 7(a),7(b)阴影区域)。

3 讨论

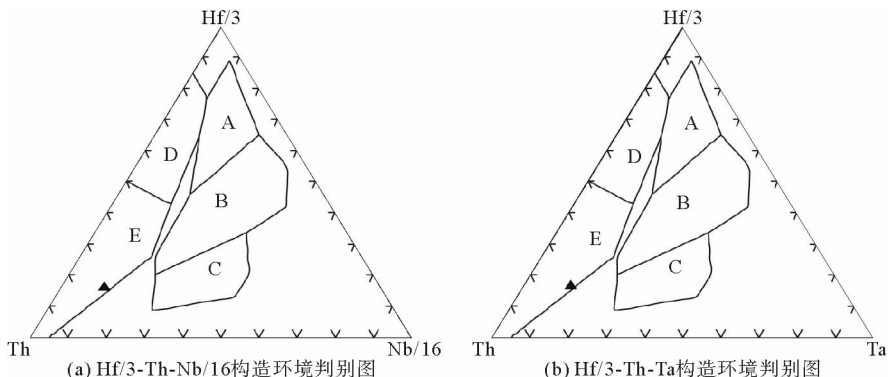
3.1 下二台群盘岭组角闪变粒岩原岩形成时代

研究区构造、岩浆活动的复杂性使该区地层时代的确认和划分具有很大争议。辽宁第一区调队于 1969—1970 年建立了下二台群,自下而上将其划分为盘岭组、黄顶子组、烧锅屯组和王相屯组,时代定为奥陶—志留纪。《吉林省区域地层表》^[11]根据原建组单位建议,取消王相屯组,而时代保持不变。1975 年,铁岭地质队将下二台群定为石炭纪,自上而下分为天桥山组、小泉头组和盘岭组。王东方^[18]采集了下二台群盘岭组火山岩,经 Rb-Sr 测定年龄为 $456 \pm 36 \text{ Ma}$,其时代为寒武—奥陶纪。冯佐峰等^[11]认为烧锅屯建组剖面多为花岗质糜棱岩,应予以取消;下二台群保留下部盘岭组,上部为黄顶子组,时代为奥陶纪。贾大成^[10]建议下二台群的王相屯组、黄顶子组、盘岭组应分别与吉林下古生界(呼兰群)的桃山组、石缝组、黄莺屯组对比,时代属于寒武—志留纪。唐克东等^[11]恢复原四组划分意见,并根据黄顶子组石英钠长斑岩 Rb-Sr 等时线年龄 $456 \pm 36 \text{ Ma}$,将其时代定为晚奥陶世,王相屯组则可能属于早志留世。前人受技术手段所限,缺乏系统精确的年代学研究方法,对下二台群的形成时代未能达成共识。因此,本文利用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年对下二台群的形成时代进行限定。

锆石的 CL 图像和 Th/U 比值(0.31~2.5)均显示岩石样品具有岩浆成因特征。定年结果显示,盘岭组角闪变粒岩原岩的形成时代为晚古生代石炭纪早期($348.8 \pm 4.4 \text{ Ma}$)。

3.2 构造环境

在岩浆演化过程中,Th、Hf、Ta、Nb 等元素不易受到后期地质作用的干扰,因此可以利用它们分析火山岩形成的大地构造背景。盘岭组角闪变粒岩富集大离子亲石元素(Rb、U、Th 等)及 LREE,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等,具有活动大陆边缘火山岩特征^[19-20]。在 Hf/3-Th-Nb/16 和 Hf/3-Th-Ta 图解中(图 8),样品均落在钙碱性玄武岩区内,反映角闪变粒岩形成于陆缘弧环境(活动大陆边缘)^[17]。在 Th-Ta 构造环境判别图中(图 9),样品落入火山弧区域中,同样显示构造环境为活动大陆边缘。



A、正常型洋脊玄武岩;B、富集型洋脊玄武岩和板内玄武岩;C、板内碱性玄武岩;D、岛弧拉斑玄武岩;E、钙碱性玄武岩。

图 8 构造环境判别图(图(a)据 Wood,1980,图(b)据 Wood,1979)

Fig. 8 Tectonic environment discrimination diagrams(Fig(a) from wood,1980;Fig(b) from wood,1979)

部分学者认为中泥盆世或晚泥盆世到早石炭世华北北缘不存在俯冲作用^[21-22],孟祥化等^[23]、Cope等^[24]

通过对华北克拉通北部晚古生代-早中生代沉积岩中锆石以及古气候研究表明,华北克拉通北缘古生代期间为活动陆缘。马旭等^[25]通过对华北克拉通北缘的波罗诺岩体研究,认为该岩体的形成与古亚洲洋板片在古生代期间向华北克拉通之下的俯冲作用有关,暗示华北板块北缘晚古生代期间为安第斯型活动大陆边缘。王挽琼^[17]通过对华北板块北缘中段早石炭世火成岩研究,认为该火成岩形成于大陆边缘弧环境,古亚洲洋向华北板块北缘俯冲。

本文运用岩石地球化学图解,并与前人研究成果进行对比分析,认为盘岭组角闪变粒岩原岩形成的构造环境为活动大陆边缘,结合其形成时代(348 ± 4.4 Ma),推断研究区早石炭世的大地构造背景为活动大陆边缘。

4 结论

- 1) 昌图下二台群盘岭组角闪变粒岩原岩为玄武岩,LA-ICP-MS 定年结果显示原岩形成时代为石炭纪早期(348 ± 4.4 Ma),而非前人认为的寒武-志留纪。
- 2) 岩石地球化学特征研究表明,角闪变粒岩具有相对富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HSFE),以及弱的 Eu 异常的地球化学特征。
- 3) 盘岭组角闪变粒岩的岩石地球化学特征研究表明,早石炭世华北板块北缘为活动大陆边缘,并受到古亚洲洋板块的俯冲作用。

参考文献:

[1] 韩作振,宋志刚,高丽华,等. 华北板块北缘东段古生代沉积特征及盆地演化研究进展[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2014,33(2):1-10.
HAN Zuozhen, SONG Zhigang, GAO Lihua, et al. Progress in the eastern section of the northern margin of the North China plate Paleozoic sedimentary basin evolution and characteristics[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2014, 33(2): 1-10.

[2] SENGOR A M C, NATALIN B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altiid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 36(4): 299-307.

[3] 曹花花. 华北板块北缘东段晚古生代—早中生代火成岩的年代学与地球化学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[4] 周晓东. 吉林省中东部地区下石炭统—下三叠统地层层序及构造演化[D]. 长春: 吉林大学, 2009: 35-42.

[5] 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(4): 584-605.
LI Jinyi, ZHANG Jin, YANG Tiannan, et al. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian orogenic region and its adjacent areas[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(4): 584-605.

[6] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造: 中国及邻区大地构造图及简要说明[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-50.

[7] 付长亮, 孙德有, 张兴洲, 等. 吉林珲春三叠纪高镁闪长岩的发现及地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1089-1102.
FU Changliang, SUN Deyou, ZHANG Xingzhou, et al. Discovery and geological significance of the Triassic high-Mgdiorites in Hunchu area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1089-1102.

[8] CAO H H, XU W L, PEI F P, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic intrusive rocks in eastern segment of the northern margin of the North China Block and its tectonic implications[J]. Lithos, 2013, 170-171: 191-207.

[9] 王志伟, 裴福萍, 曹花花, 等. 华北板块北缘东段石炭纪早期的岩浆事件及其构造意义: 锆石 U-Pb 年龄与岩石组合证据

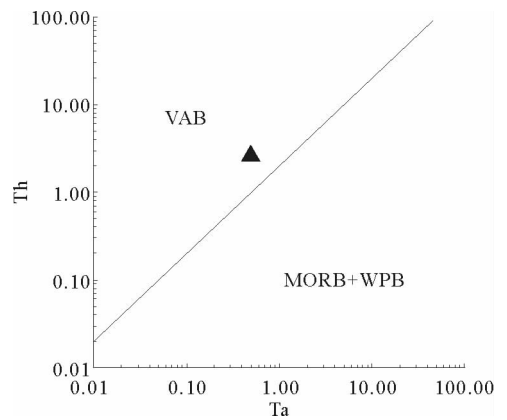


图9 Th-Ta 构造环境判别图

Fig. 9 Th-Ta tectonic discrimination diagram

- [J]. 地质通报, 2013, 32(2-3): 279-286.
- WANG Zhiwei, PEI Fuping, CAO Huahua, et al. Earliest Carboniferous magmatic event in the eastern section of the northern margin on the North China plate and its tectonic implications Evidence from rock association and zircon U-Pb geochronology[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(2-3): 279-286.
- [10] 贾大成. 辽宁北部槽区下二台群及其区域对比[J]. 辽宁地质, 1989(4): 361-366.
- JIA Dacheng. Xiaertai group in the geosyncline of north Liaoning and regional correlation[J]. Liaoning Geological, 1989(4): 361-366.
- [11] 吉林省地质矿产局. 吉林省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 80-103.
- [12] 杨森. 辽北辽河群和下二台群[J]. 吉林地质, 1999, 18(3): 11-17.
- YANG Sen. Northern Liaoning Liaohe group and Xiaertai group[J]. Jilin Geology, 1999, 18(3): 11-17.
- [13] 胡晋伟, 李东涛, 周勇, 等. 昌图县下二台岩群的构造-岩层分析[J]. 辽宁地质, 2000, 17(4): 271-279.
- HU Jinwie, LI Dongtao, ZHOU Yong, et al. Analysis on the tectono-strata of Xiaertai rock group in Changtu county[J]. Liaoning Geology, 2000, 17(4): 271-279.
- [14] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1-2): 34-43.
- [15] LIU Y S, HU Z C, ZONG K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [16] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [17] 王挽琼. 华北板块北缘中段晚古生代构造演化, 温都尔庙-集宁火成岩年代学、地球化学的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [18] 王东方. 关于辽北地区辽河、二台子群的地层和构造问题[J]. 辽宁地质, 1987(2): 155-164.
- WANG Dongfang. On the problems of strata and tectonics of Liaohe and Xiaertaizi group in northern Liaoning area[J]. Liaoning Geological, 1987(2): 155-164.
- [19] FRANCALANCI L, Taylor S R, McCulloch M Y, et al. Geochemical and isotopic variations in the calc-alkaline rocks of Aegolian arc, southern Tyrrhenian sea, Italy: Constraints on magma genesis[J]. Contrib Mineral Petrol, 1993, 113: 300-313.
- [20] Gill J B. Early geochemical evolution of an oceanic island arc and back arc; Fiji and the South Fiji basin[J]. Journal of Geology, 1987, 95: 589-615.
- [21] TANK K D. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean Craton[J]. Tectonics, 1990, 9: 249-260.
- [22] 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 1994(3): 220-230.
- HONG Dawei, HUANG Huaizeng, XIAO Yijun, et al. Permian alkaline granites and tectonic significance in Central Inner Mongolia[J]. ACTA Geologica Sinica, 1994(3): 220-230.
- [23] 孟祥化, 葛铭. 中国华北地台二叠纪前陆盆地的发现及其证据[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 8-14.
- MENG Xianghua, GE Ming. Discovery and evidence of the foreland basin in the north China platform in the Permian period[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1): 8-14.
- [24] COPE T, RITTS B D, DARBY B J, et al. Late Paleozoic sedimentation on the northern margin of the north China block: Implications for regional tectonics and climate change[J]. International Geology Review, 2005, 47(3): 270-396.
- [25] 马旭, 陈斌, 陈家富, 等. 华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义: 岩石学、锆石 U-Pb 年龄、Nd-Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1830-1850.
- MA Xu, CHEN Bin, CHEN Jiafu, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemical, Sr-Nd isotopic, and in-situ Hf isotopic data of the Late Carboniferous-Early Permian plutons in the northern margin of the North China Craton[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 42(12): 1830-1850.

(责任编辑: 吕海亮)