文章编号：1004—5589（2017）02—0413—15

黑龙江东部依兰珠山变辉长岩的年代学、地球化学及其构造意义

朱莹，杨浩，董玉，和越，毕君辉，王智慧，纪政

吉林大学 地球科学学院，长春 130061

摘要：对黑龙江东部依兰珠山变辉长岩进行了锆石年代学和地球化学研究，以确定其形成时代、成因及构造背景。变辉长岩锆石均呈自形-半自形晶，具典型的条痕状吸收特征和较高的Th/U比值（0.20~0.86），暗示其岩浆成因。LA-ICP-MS U-Pb测年结果为（256±3）Ma，表明珠山变辉长岩形成于晚二叠世。地球化学特征显示变辉长岩具有贫硅，富镁、铁、铝、钙的特征；其轻稀土元素（LREEs）和大离子亲石元素（Rb、Ba）富集，重稀土元素（HREEs）和高场强元素（Nb、Ta、Zr、Hf和Ti）亏损。结合区域地质资料，认为珠山变辉长岩为俯冲流体交代地幔楔的产物，其形成可能与古大洋板块的俯冲作用有关，暗示佳木斯地块与松嫩地块在晚二叠世之前尚未碰撞拼合。

关键词：佳木斯地块西缘；变辉长岩；年代学；地球化学；俯冲作用

中图分类号：P597；P595 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2017.02.009

Geochronology and geochemistry of Zhushan metagabbro in Yilan, eastern Heilongjiang and its tectonic implication

ZHU Ying, YANG Hao, DONG Yu, HE Yue, BI Jun-hui, WANG Zhi-hui, JI Zheng

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: The authors analyzed zircon geochronological data and geochemical data of Zhushan metagabbro from Yilan, eastern Heilongjiang to determine their age, petrogenesis and tectonic setting. Zircons from metagabbro are euhedral-subhedral in shape with typical striation absorption features and high Th/U ratios (0.20~0.86), implying their magmatic origin. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that Zhushan metagabbro from Yilan formed during Late Permian with age of (256±3) Ma. The geochemical characteristics show that these metagabbros are low in silicon and high in magnesium, iron, aluminum and calcium. The rocks are enriched in LREEs and LILEs (Rb, Ba), and depleted in HREEs and HFSEs (Nb, Ta, Zr, Hf and Ti). Combined with the regional geological data, it is proposed that Zhushan metagabbro was derived from a mantle wedge that had been metasomatized by subducted slab-derived fluids. Its formation was probably related to the subduction of a paleo-oceanic plate, which implies that the collision between the Jiamusi Massif and the Songnen Massif may have not happened before Late Permian.

Key words: western margin of Jiamusi massif; metagabbro; geochronology; geochemistry; subduction

收稿日期：2016-09-07；**改回日期**：2016-11-15

基金项目：国家自然科学基金重点项目（41330206）、吉林大学大学生创新创业训练计划（2015610789）联合资助.

通讯作者：杨浩（1990-），男，主要从事岩石学、地球化学研究. E-mail：yanghao12@mails.jlu.edu.cn

0 引言

黑龙江杂岩指出露于佳木斯地块西缘的构造杂岩带，分布于黑龙江省牡丹江、依兰及萝北等地，沿牡丹江断裂呈南北向延伸。该杂岩以发育蓝片岩等高压变质岩石为特征，由不同时代、不同成因和不同构造背景的岩石构造混杂而成[1-4]，是探讨地体拼帖、构造域叠加与转换过程的理想地区之一，因而引起地质学家们的广泛关注。曹熹等[3]和李锦轶等[4]认为黑龙江杂岩为佳木斯地块与周围块体拼合而形成的构造混杂岩，并且其原岩和变质变形时代可能为古生代。Wu et al.[5]则认为黑龙江杂岩可能是一套与古太平洋板块俯冲相关的侏罗纪增生杂岩。此外，Zhou et al.[6]通过对牡丹江和依兰地区蓝片岩的系统研究，提出佳木斯—兴凯—布列亚地块和松嫩地块最终拼合时间为晚三叠世至早侏罗世。Zhu et al.[7]最近在依兰地区识别出一套结晶年龄为（141.8±1）Ma 的碱性蓝片岩，暗示佳木斯地块和松嫩地块之间的古大洋在 141 Ma 之前并没有最终闭合。显然，目前关于黑龙江杂岩的时代归属、变质变形历史以及区域构造演化等问题的认识尚存在较大分歧。以往的研究重点集中在黑龙江杂岩中的蓝片岩和陆源碎屑岩，与之相比，佳木斯地块西缘广泛出露的晚古生代火成岩的研究相对滞后，这制约了对黑龙江杂岩以及黑龙江东部晚古生代构造演化的深刻认识。鉴于此，笔者选择黑龙江东部依兰珠山变辉长岩作为研究对象，对其进行了锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究，进而确定变辉长岩的形成时代、成因及构造背景，为讨论佳木斯地块与松嫩地块间的碰撞拼合历史提供制约。

1 地质概况及样品特征

中国东北位于中亚造山带东段，古生代期间，其具有多块体拼合的构造属性，自西北至东南依次为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块和兴凯地块[8,9]。中生代早期，古亚洲洋已经完成闭合，东北地区开始受到后造山伸展、古太平洋和蒙古—鄂霍次克古大洋三种构造机制的叠加作用[10-14]。佳木斯地块是东北若干变质地体中最著名的一个，其结晶基底主要由麻粒岩相-角闪岩相变质的麻山杂岩和大面积展布的花岗质岩石组成。麻山杂岩主要出露在鸡西市西麻山—密山一带，为一套含长英质片麻岩、夕线石榴片麻岩、石墨片岩和高镁大理岩等变质岩的孔兹岩系，其变质作用发生在 500 Ma±[15-18]。佳木斯地块上花岗质岩浆作用主要存在两期：540～515 Ma 和 290～254 Ma，其形成可能分别与泛非期变质造山作用和古大洋板块的西向俯冲作用有关[19-23]。黑龙江杂岩（原黑龙江群）呈南北向断续分布在佳木斯地块西缘，先前一直被当作佳木斯地块上的早-中元古代变质地层[24]。近年来研究显示原黑龙江群实际上为一套具有俯冲碰撞性质的增生杂岩，其原岩包括泥沙质碎屑岩、硅质岩、碳酸岩、橄榄岩及各类火山岩，随后经历了蓝片岩相-高绿片岩相或高绿片岩相-低角闪石岩相变质作用。

变辉长岩岩体位于黑龙江省东部依兰县城东南珠山林场，大地构造位置处于佳木斯地块西缘（图 1）。该岩体出露面积约 0.05～0.1 km^2。野外可见其侵入到黑龙江杂岩大理岩之中（图 2a），局部可见晚期侵入的花岗质岩脉（图 2b）。辉长岩新鲜面颜色不一，由灰黑-灰-浅灰变化，由于后期的变质变形作用，多发育程度不等的片麻状构造（图 2c）和石榴子石变质矿物（图 2d）。珠山岩体变辉长岩多呈中粒柱状粒状变晶结构，主体为片麻状构造，局部变形较弱的部位呈块状构造。主要矿物组成为斜长石（35%～45%）+角闪石（40%～50%）+黑云母（3%～6%）+单斜辉石（小于 3%）+石榴子石（2%～5%）。单斜辉石蚀变严重，粒径 0.5～2 mm，局部可见其发生角闪石化（图 3a）；斜长石主要为半自形粒状-柱状，粒径 0.3～1.5 mm，聚片双晶发育，绢云母化、黝帘石化和绿帘石化蚀变严重（图 3b，c），部分可见其呈包体赋存于角闪石内（图 3d）；角闪石呈半自形-自形针状或柱状，粒径约 1.5 mm；黑云母呈棕褐色，鳞片状，粒径约 0.2 mm，是形成片麻状构造的主要矿物。副矿物为锆石、磷灰石和少量不透明矿物等。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

本文样品的锆石分选工作在河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。分选后在显微镜下挑选出透明、晶形较好以及无明显裂痕的锆石颗粒置于双面胶上，灌上环氧树脂制靶，用于透

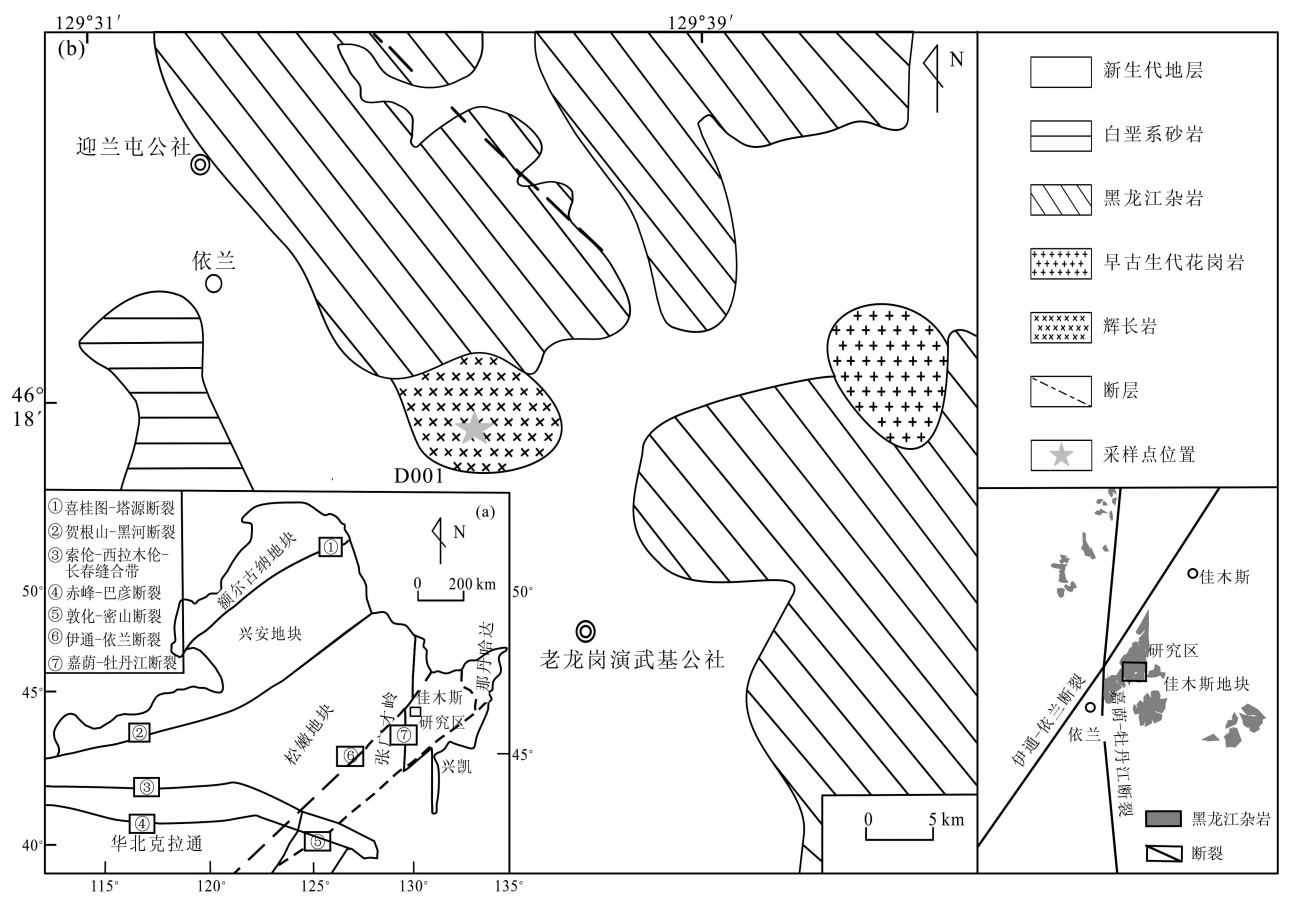


图 1　东北地区构造图（a）和依兰地区地质简图（b）

Fig. 1　Tectonic map of Northeast China (a) and simplified geological map of Yilan area (b)

射光、反射光和阴极发光（CL）图像采集以及锆石 U-Pb 同位素测试分析。本次锆石 U-Pb 年代学测试在吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室完成，采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱计（LA-ICP-MS）对锆石进行微区原位单点 U-Pb 同位素定年。其中，激光剥蚀使用德国相干公司（Coherent）COMPExPro 型 ArF 准分子激光器，质谱仪为美国安捷伦公司 7500a 型四极杆等离子质谱仪。实验过程中采用高纯度氦气（He）作为剥蚀物质的载气，激光器工作频率为 8 Hz，测试点的激光束斑直径为 32 μm，激光能量密度为 10 J/cm^2。使用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化，样品测定时用哈佛大学标准锆石 91500 作为外部校正，普通铅校正采用 Andersen[25] 的方法。锆石 U-Pb 同位素比值及元素含量采用 Glitter（ver. 4.4，Macquarie University）程序进行处理，年龄计算采用国际标准程序 Isoplot/Ex（3.0）。

2.2　全岩主量和微量元素分析

野外采集的样品经过显微镜下薄片鉴定，选择新鲜的样品用于地球化学分析。全岩的主量元素和微量元素分析由核工业北京地质研究院分析测试中心完成。其中主量元素在 PW2404 型荧光光谱仪（XRF）上进行，测试流程参照国家标准 GB/T14506.14-2010；微量元素分析采用 ELEMENT XR 型电感耦合等离子质谱仪（ICP-MS）完成，测试流程参照国家标准 GB/T14506.30-2010。

3　分析结果

3.1　锆石的 U-Pb 定年结果

变辉长岩样品 D001（46°17′52.1″N，129°36′58.8″E）的锆石 LA-ICP-MS 定年数据列于表 1。阴极发光（CL）图像和 U-Pb 谐和图如图 4 和图 5 所示。由于珠山变辉长岩的形成时代在显生宙范围



图 2 依兰珠山变辉长岩侵入到黑龙江杂岩大理岩中（a）、晚期侵入的花岗质岩脉（b）、片麻状构造（c）和石榴子石变质矿物（d）

Fig. 2 Zhushan metagabbros from Yilan that intrude the marble of Heilongjiang Complex (a), late-stage granitic dyke (b), gneissic structure (c) and garnet metamorphic mineral (d)

内，故采用$^{206}Pb/^{238}U$ 值作为锆石的结晶年龄。

从 CL 图像中可以看出，变辉长岩样品中的锆石主要呈自形-半自形晶，以长柱状和板状为主，部分晶体表面发育裂纹，粒径为 50 ~ 250 μm，其内部结构清晰，条痕吸收程度不等，具有镁铁质岩浆结晶锆石的典型特征。另外，多数锆石的外围发育一层很窄的白边，可能是低级变质作用过程中流体丰富体系下形成的。由于白边的范围太小，激光的束斑（直径 32 μm）不能准确定位，故没能测定其所对应的年龄。本次研究对 D001 样品共进行了 23 个锆石颗粒的分析，其 U、Pb 含量分别介于（52 ~ 150）$\times 10^{-6}$ 和（20 ~ 110）$\times 10^{-6}$，Th/U 比值为 0.20 ~ 0.86，所有样品数据点均落在谐和线上或附近，其$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄介于 225 ~ 265 Ma 之间（表 1），加权平均值为（256 ± 3）Ma（MSDW = 0.81，图 5）。

3.2 地球化学特征

依兰珠山变辉长岩 10 件代表性样品的主量元素和微量元素分析结果如表 2 所示。

3.2.1 主量元素

珠山变辉长岩的 SiO_2 含量为 47.59% ~ 52.25%，TiO_2 含量为 1.01% ~ 1.83%，Al_2O_3 含

表 1　依兰珠山变辉长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

Table 1　LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for Zhushan metagabbro from Yilan

样品编号	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$	
	含量/10^{-6}				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ
D001-变辉长岩																
D001-01	45.4	544	879	0.62	0.052 80	0.001 33	0.298 93	0.008 66	0.041 06	0.001 01	320	30	266	7	259	6
D001-02	36.1	223	792	0.28	0.052 08	0.001 37	0.287 73	0.008 62	0.040 07	0.000 99	289	31	257	7	253	6
D001-03	17.7	128	381	0.33	0.051 75	0.001 62	0.286 11	0.009 78	0.040 10	0.001 00	274	38	255	8	253	6
D001-04	11.5	86	240	0.36	0.052 11	0.001 97	0.295 72	0.011 83	0.041 16	0.001 05	290	48	263	9	260	7
D001-05	8.7	87	175	0.50	0.051 94	0.002 44	0.293 83	0.014 22	0.041 03	0.001 07	283	64	262	11	259	7
D001-06	5.6	47	117	0.40	0.050 95	0.002 71	0.280 85	0.015 23	0.039 98	0.001 07	239	76	251	12	253	7
D001-07	5.5	41	119	0.34	0.050 90	0.002 63	0.281 86	0.014 90	0.040 16	0.001 07	236	74	252	12	254	7
D001-08	35.5	317	737	0.43	0.050 78	0.001 30	0.284 76	0.008 38	0.040 67	0.001 00	231	31	254	7	257	6
D001-09	3.0	26	64	0.41	0.053 81	0.005 16	0.290 64	0.027 54	0.039 17	0.001 28	363	155	259	22	248	8
D001-10	6.5	55	130	0.42	0.055 54	0.002 57	0.319 09	0.015 21	0.041 66	0.001 09	434	61	281	12	263	7
D001-11	4.7	28	102	0.28	0.049 64	0.002 97	0.282 84	0.017 09	0.041 32	0.001 13	178	89	253	14	261	7
D001-12	2.5	20	52	0.39	0.049 09	0.003 94	0.274 62	0.022 00	0.040 58	0.001 20	152	126	246	18	256	7
D001-13	7.8	47	173	0.27	0.054 17	0.002 42	0.294 49	0.013 62	0.039 43	0.001 03	378	59	262	11	249	6
D001-14	34.3	162	786	0.21	0.054 20	0.001 51	0.290 55	0.009 11	0.038 88	0.000 96	379	32	259	7	246	6
D001-15	27.1	240	560	0.43	0.051 24	0.001 51	0.288 25	0.009 42	0.040 80	0.001 01	252	35	257	7	258	6
D001-16	8.3	128	149	0.86	0.053 03	0.002 26	0.310 38	0.013 77	0.042 45	0.001 10	330	55	274	11	268	7
D001-17	51.1	684	1 238	0.55	0.055 35	0.001 29	0.270 24	0.007 42	0.035 41	0.000 87	426	27	243	6	224	5
D001-18	19.7	184	406	0.45	0.052 48	0.001 70	0.292 64	0.010 28	0.040 44	0.001 01	306	39	261	8	256	6
D001-19	14.7	63	321	0.20	0.049 00	0.001 73	0.279 79	0.010 59	0.041 42	0.001 04	148	45	250	8	262	6
D001-20	33.4	228	703	0.32	0.051 40	0.001 40	0.291 92	0.009 00	0.041 19	0.001 02	259	32	260	7	260	6
D001-21	52.3	326	1 121	0.29	0.049 70	0.001 40	0.279 84	0.008 83	0.040 83	0.001 01	181	34	251	7	258	6
D001-22	4.4	44	90	0.49	0.051 73	0.003 09	0.289 93	0.017 52	0.040 65	0.001 11	273	89	259	14	257	7
D001-23	6.3	51	142	0.36	0.053 00	0.002 45	0.280 16	0.013 36	0.038 34	0.001 00	329	62	251	11	243	6

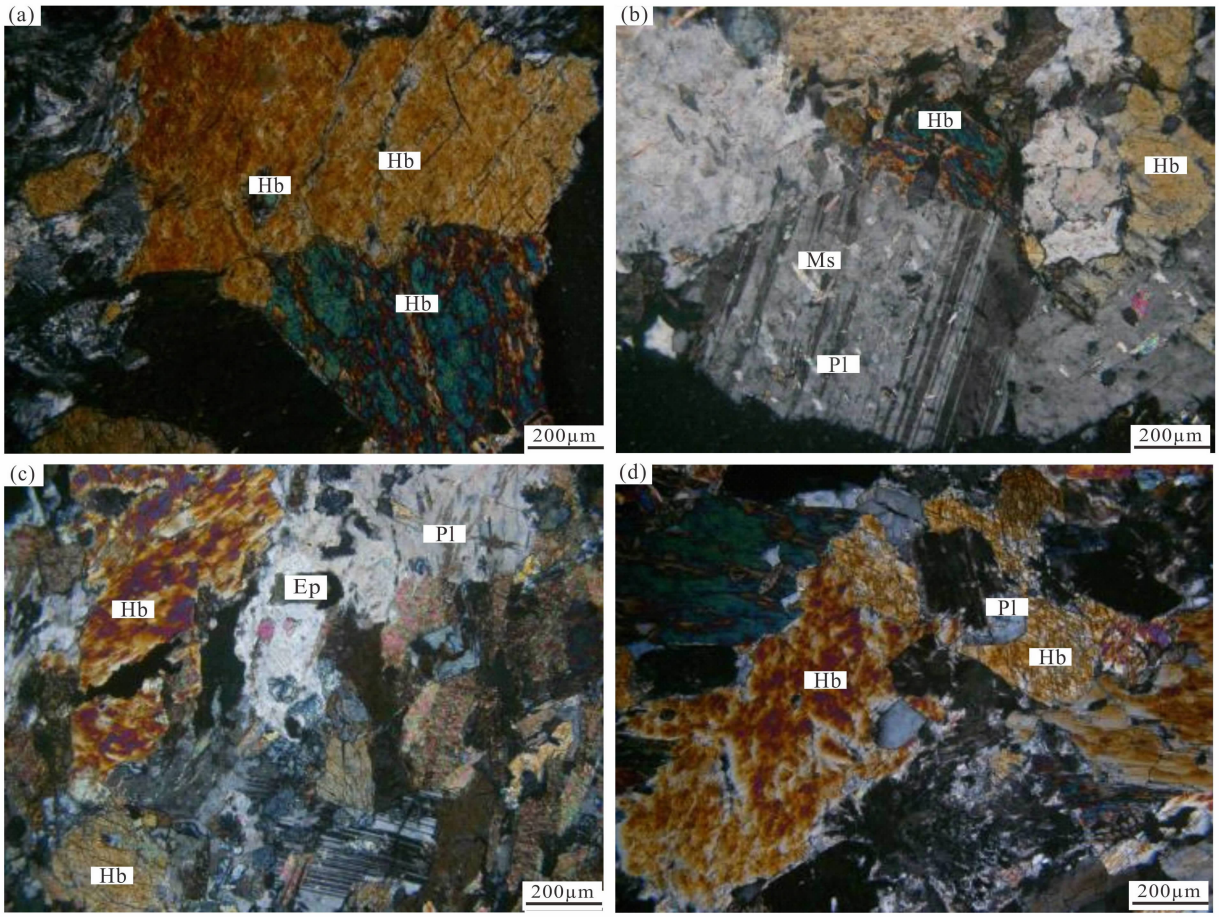


图 3 依兰珠山变辉长岩中单斜辉石局部发生角闪石化（a）、斜长石发生绢云母化、黝帘石化和绿帘石化蚀变（b，c）及斜长石呈包体赋存于角闪石内（d）

Fig. 3 Local occurrence of amphibolization of clinopyroxene in Zhushan metagabbros from Yilan (a), sericitization, zoisitization, epidotization alteration of plagioclase (b, c) and plagioclase inclusions (d) in hornblende

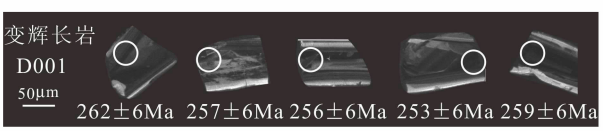


图 4 珠山变辉长岩代表性锆石的阴极发光图像

Fig. 4 CL images of representative zircons for Zhushan metagabbro

量介于 18.23% ~ 20.43%，MgO、TFe_2O_3、FeO、CaO 含量分别为 4.18% ~ 5.33%、8.9% ~ 11.21%、6.47 ~ 9.10% 和 7.5% ~ 9.50%，TFeO 的变化范围为 8.83% ~ 11.20%（大多集中在 9.5% ±），P_2O_5 含量为 0.04% ~ 0.16%，Na_2O 和 K_2O 的含量介于 3.28% ~ 3.61% 和 1.24% ~

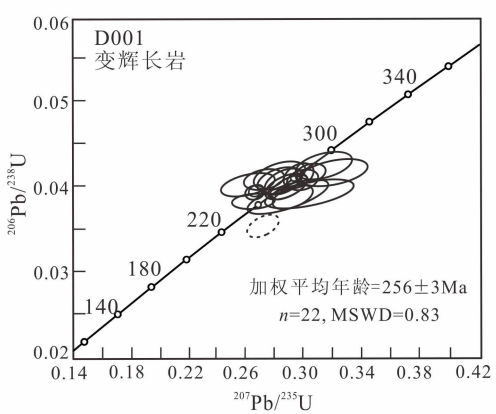


图 5 珠山变辉长岩的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram for Zhushan metagabbro

2.20%，Na_2O/K_2O 为 1.63 ~ 2.70，相对富 Na，其 $Mg^{\#}$ 值（$Mg^{\#} = MgO/40.31$）/（$MgO/40.31 + Fe_2O_3T * 2/159.7$）介于 47 ~ 51。在 Nb/Y - Zr/$TiO_2 \times 10^{-4}$图解中（图 6a），样品点均位于亚碱性玄武岩范围内；在 TFeO/MgO - SiO_2 变异图解（图 6b）和 Y/15 - La/10 - Nb/8 图解（图 6c）中，样品属于钙碱性玄武岩系列。

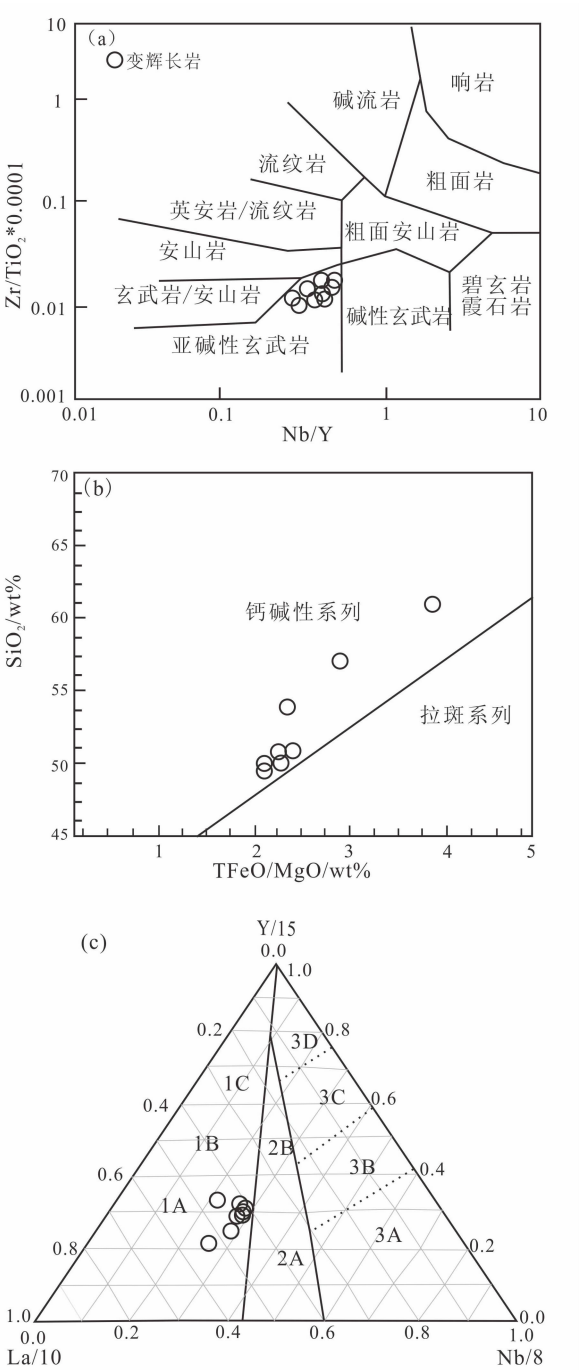
3.2.2　微量元素

珠山变辉长岩的稀土元素总量介于（156.51 ~221.72）$\times 10^{-6}$。在稀土元素球粒陨石标准化图解上（图 7a），样品呈相对富集轻稀土元素（LREEs）、贫重稀土元素（HREEs）的右倾型配分型式。重稀土斜率较大，$(Ce/Yb)_N$ 介于 1.56 ~ 9.20，而轻稀土相对较为平坦，$(La/Sm)_N$ 介于 1.56 ~ 3.05，轻重稀土分馏比较明显，LREE/HREE = 2.19 ~ 3.21，$(La/Yb)_N$ 为 4.30 ~ 9.76，所有样品均具有弱的 Eu 负异常（$\delta Eu = 0.52 \sim 0.77$，图 7b）。在微量元素原始地幔标准化蛛网图（图 7a）中，变辉长岩相对富集大离子亲石元素（LILEs）Rb、Ba 等，亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素（HFSEs），这些特征类似于岛弧或者活动大陆边缘环境形成的火山岩[29]。对于被认为在变质等地质作用过程中是不易活动的高场强元素的 Th、U，它们出现相对 Ba、K 的显著亏损，这与正常弧火山岩的典型特征存在一定的差异，可能是由于变辉长岩的源区残留有富 Th 和 U 的锆石、榍石等副矿物所致[30,31]。

4　讨论

4.1　变辉长岩的形成时代

前人主要依据 K-Ar 法定年和岩石组合类比，将珠山林场辉长质岩体形成时代置于海西晚期。由于缺少精确的同位素年代学资料，因此并不能准确反映辉长岩的形成时代。本文对珠山变辉长岩一个样品进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年，用于测试的锆石均具有典型的岩浆成因特征，23 个测试点给出了一组加权平均年龄为 256 ± 3 Ma，表明该辉长岩岩体形成于晚二叠世。该年龄与佳木斯地块西缘美作（259 ± 4 Ma）、柴河（254 ± 5 Ma）、楚山（256 ± 5 Ma）、青山（270 ± 3 Ma）以及方山（278 ± 3 Ma）[34]等花岗质岩体的形成时代一致，结合近年来发表的张广才岭地区的二叠纪花岗岩和火



1A. 钙碱性玄武岩；1B. 1A 和 1C 的过渡；1C. 火山弧玄武岩；2A. 大陆玄武岩；2B. 弧后玄武岩；3A. 大洋中脊玄武岩；3B、3C. 富集型的洋中脊玄武岩（3B - 富集，3C - 弱富集）；3D. 正常洋中脊玄武岩.

图 6　Zr/TiO_2 * 0.0001 - Nb/Y 图解（a）[26]、TFeO/MgO - SiO_2 图解（b）[27]和 La/10 - Y/15 - Nd/8 图解（c）[28]

Fig. 6　Diagrams of Zr/TiO_2 * 0.0001 - Nb/Y (a), TFeO/MgO - SiO_2 (b) and La/10 - Y/15 - Nd/8 (c)

表2 依兰珠山变辉长岩主量元素（%）和微量元素（10^{-6}）分析结果

Table 2 Major (%) and trace (10^{-6}) element compositions for Zhushan metagabbros from Yilan

样品号	D002	D003	D004	D005	D007	D008	D009	D010	D015	D021
SiO_2	47.59	47.56	52.25	48.45	48.00	47.96	55.92	48.69	59.95	48.81
TiO_2	1.71	1.54	1.57	1.83	1.57	1.68	1.01	1.75	1.08	1.36
Al_2O_3	19.90	19.12	18.29	19.35	18.94	17.83	19.18	19.23	18.08	18.22
Fe_2O_3	10.02	10.26	8.90	9.92	10.70	11.18	6.68	9.85	6.44	11.05
MgO	4.60	5.33	4.18	4.75	5.15	4.91	2.57	4.76	1.83	5.10
CaO	7.88	8.99	7.58	8.45	8.15	8.92	7.51	8.46	5.91	9.37
Na_2O	3.49	3.38	3.31	3.35	3.21	3.53	4.33	3.46	3.34	3.29
K_2O	2.14	1.70	1.70	1.73	1.79	1.48	1.16	1.58	1.49	1.22
MnO_2	0.08	0.10	0.07	0.14	0.17	0.19	0.07	0.11	0.12	0.13
P_2O_5	0.15	0.08	0.08	0.06	0.04	0.12	0.09	0.08	0.05	0.04
LOI	2.44	1.93	2.04	1.93	2.26	1.69	1.44	2.01	1.69	1.36
Total	100.00	99.99	99.97	99.96	99.98	99.49	99.96	99.97	99.98	99.96
Sc	17.90	17.90	17.10	20.70	17.90	23.20	12.90	17.60	6.51	26.40
V	95.40	122.00	131.00	140.00	125.00	162.00	65.00	129.00	48.80	147.00
Cr	7.89	18.20	25.30	28.60	22.80	27.80	13.70	32.60	8.54	37.10
Co	19.50	25.30	19.20	22.70	25.40	23.70	11.00	21.50	8.87	20.80
Ni	6.05	9.77	9.48	11.00	9.19	11.70	5.40	18.60	4.13	7.89
Cu	17.50	10.70	14.20	15.80	12.70	16.10	9.46	15.80	8.44	11.50
Zn	158.00	156.00	171.00	158.00	178.00	170.00	117.00	163.00	87.50	178.00
Ga	29.20	27.30	28.70	27.80	27.30	27.00	26.40	27.30	22.90	29.90
Rb	72.90	45.10	51.50	49.50	56.60	35.10	26.80	43.10	51.80	24.50
Sr	882.00	803.00	833.00	844.00	810.00	871.00	973.00	869.00	940.00	866.00
Y	21.50	26.50	24.40	25.60	29.60	30.60	13.50	23.60	9.03	35.50
Zr	242.00	151.00	216.00	200.00	185.00	192.00	266.00	211.00	372.00	138.00
Nb	13.40	12.50	12.70	13.20	15.60	13.20	10.40	14.20	8.61	11.90
Cs	1.08	0.44	0.66	0.64	1.02	0.81	0.51	0.71	0.61	0.49
Ba	1087.00	781.00	1124.00	1052.00	966.00	658.00	505.00	965.00	1012.00	417.00
La	35.10	23.60	19.50	23.40	26.50	25.70	90.50	29.50	56.40	31.99
Ce	74.90	57.90	49.40	61.50	68.80	65.40	148.00	71.50	98.10	82.50
Pr	10.20	8.28	7.34	8.96	9.66	9.45	15.30	10.10	10.30	12.20
Nd	44.40	37.60	35.70	40.40	44.80	43.30	50.60	43.00	34.80	55.30
Sm	7.99	7.42	7.53	7.78	8.35	8.30	6.68	8.27	4.13	10.90
Eu	2.32	1.98	2.10	2.33	2.08	2.38	2.20	2.25	1.74	2.24
Gd	7.25	7.10	6.71	6.75	7.16	7.48	5.59	6.99	3.41	9.78
Tb	1.06	1.08	1.05	0.98	1.11	1.17	0.66	1.04	0.40	1.53
Dy	4.90	5.29	5.02	5.05	5.64	6.01	3.23	4.86	1.87	7.26
Ho	0.78	0.91	0.87	0.84	1.06	1.06	0.53	0.81	0.33	1.22
Er	2.12	2.44	2.32	2.47	3.09	3.11	1.32	2.26	0.91	3.38
Tm	0.30	0.37	0.32	0.37	0.45	0.43	0.18	0.31	0.15	0.46
Yb	1.57	2.26	1.98	2.25	2.82	2.69	1.03	1.78	0.94	2.59
Lu	0.22	0.28	0.28	0.31	0.43	0.38	0.15	0.24	0.16	0.37
Hf	6.15	4.39	5.39	5.23	5.29	5.06	6.76	4.79	8.99	4.24
Ta	0.49	0.59	0.22	0.62	0.61	0.52	0.41	0.69	0.24	0.50
Pb	9.11	8.25	14.40	10.50	10.10	9.48	10.80	7.25	15.10	20.70
Th	1.61	0.63	0.43	0.55	0.75	0.31	9.99	0.65	5.37	0.46
U	0.61	0.37	0.34	0.48	0.35	0.30	0.61	0.45	0.56	0.30

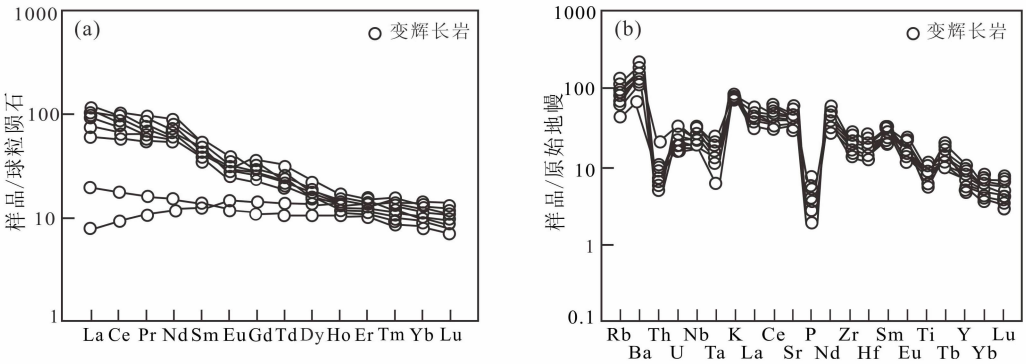


图 7　依兰珠山变辉长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解（a）[32] 和微量元素原始地幔标准化图解（b）[33]

Fig. 7　Chondrite-normalized REE patterns（a）and primitive mantle（PM）normalized trace element patterns（b）for Zhushan metagabbros from Yilan

山岩[35-37]，指示佳木斯地块西缘与松嫩地块东缘存在大规模的二叠纪岩浆事件。

4.2　源区性质与岩浆演化

晚二叠世珠山变辉长岩贫硅、富镁（SiO_2 = 47.59% ~ 52.25%，MgO = 4.18% ~ 5.33%），Sc 值介于（8 ~ 33）× 10^{-6}，Co 值介于（19.2 ~ 25.4）× 10^{-6}，指示珠山辉长岩具有幔源岩浆的属性[38]，可能为岩石圈地幔部分熔融的产物。珠山辉长岩具有 Nb、Ta 等高场强元素亏损的特征。造成基性岩浆岩中 Nb、Ta 亏损的主要原因有 3 种[39]：①金红石等富 HFSEs 矿物在岩浆源区熔融过程中有残留[40]；②在岩浆源区或岩浆演化过程中受到了来自陆壳物质的混染[41]；③受到俯冲流体或熔体的交代作用[42]。Ionov et al.[40] 研究表明，若金红石等矿物在岩浆源区熔融过程中进入残留相，熔体则会出现 Nb、Ta 等元素的显著亏损，同时还会造成 Zr、Hf、Ti 等其他高场强元素的明显负异常。然而研究区变辉长岩 Nb 和 Ta 含量分别为（8.61 ~ 15.6）× 10^{-6} 和（0.24 ~ 0.69）× 10^{-6}，并不存在明显的亏损现象。同时在微量元素蛛网图（图 7a）中可以看出 Zr、Hf 只是轻微亏损。因此，珠山变辉长岩亏损 Nb、Ta 等元素的原因并不是岩浆源区残留有富 HFSEs 的矿物。研究区变辉长岩存在 Zr、Hf、Ti 的亏损，La/Nb 值介于 1.54 ~ 2.62（多集中在 2.2 ±），几乎所有样品点的值都大于中国东部陆壳 1.7 的平均值，暗示辉长质岩浆不是由 La/Nb 很低的幔源岩浆经地壳物质混染形成。另外，在 Ba/Nb - La/Nb 相关图解中，样品投点均位于弧火山岩的范围内，处于大陆地壳平均组成的上方，同样表明其不是简单陆壳混染的产物。

因此，笔者认为珠山辉长岩在形成和演化过程中没有经历大规模的地壳混染作用，其 Nb、Ta 等元素的亏损可能与俯冲带流体/熔体的交代作用有关，这也得到了 $(Hf/Sm)_N$ - $(Ta/La)_N$ 相关图解中（图 8）投点结果的支持。一般而言，经过熔体交代作用形成的中基性火成岩具有富 Nb、较高的 P_2O_5 和 TiO_2 以及较低的 LREE/HREE 比值的地球

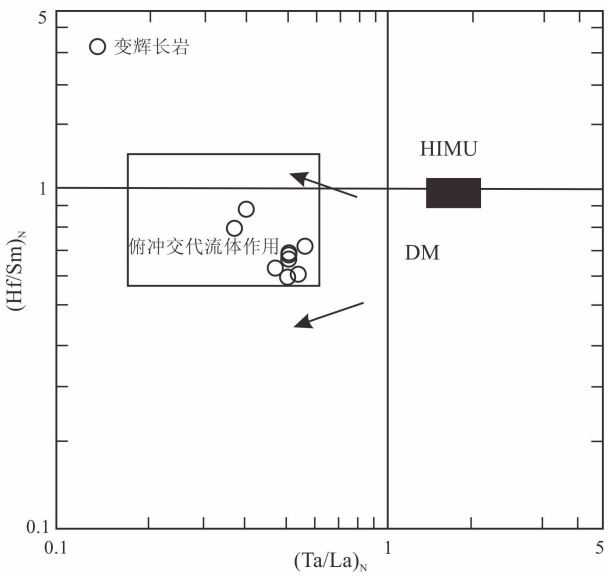


图 8　依兰珠山变辉长岩的 $(Hf/Sm)_N$ - $(Ta/La)_N$ 图解[43]

Fig. 8　Diagram of $(Hf/Sm)_N$ - $(Ta/La)_N$ for Zhushan metagabbros from Yilan

化学特征。但研究区变辉长岩的 Nb（11.9×10^{-6} ~ 15.6×10^{-6}）、P_2O_5（0.05×10^{-6} ~ 0.15×10^{-6}）和 TiO_2（1.38×10^{-6} ~ 1.87×10^{-6}）含量均较低，且 LREE/HREE 比值（2.19 ~ 3.21，平均 2.50）较高，这些特征与俯冲带熔体交代作用形成的岩石存在很大差异。此外，在 Rb/Y – Nb/Y（图 9a）和 Nb/Zr – Th/Zr 图解（图 9b）中，所有样品均表现出流体交代富集的趋势。综上，可以判断珠山辉长岩的源区应该为受俯冲带流体交代作用改造过的地幔楔。

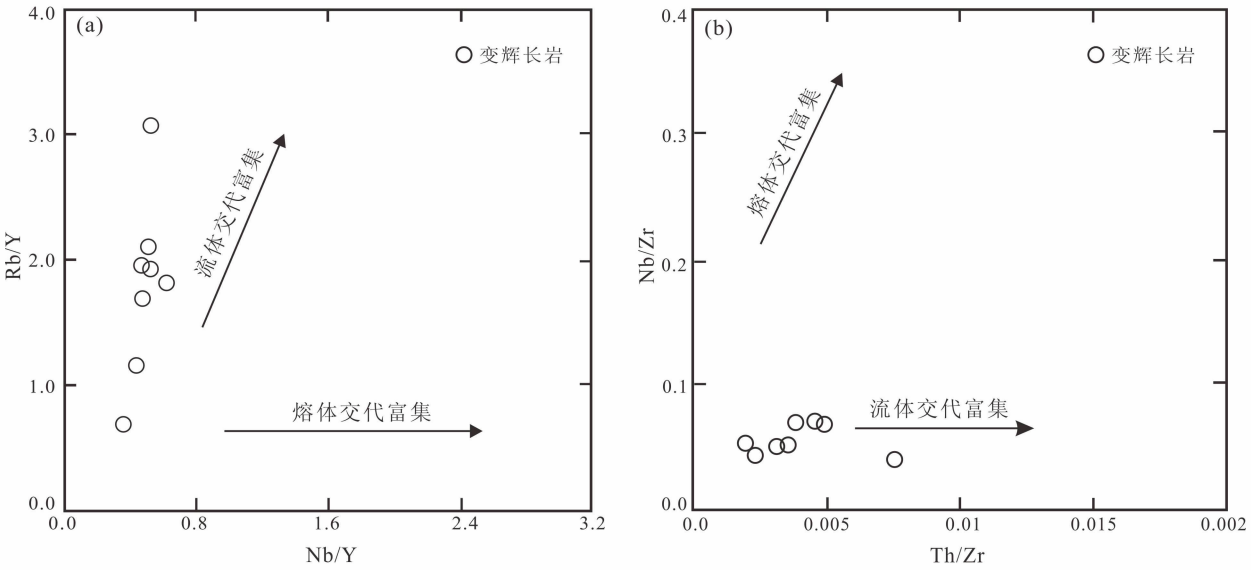


图 9 依兰珠山变辉长岩 Rb/Y – Nb/Y 图解（a）和 Nb/Zr – Th/Zr 图解（b）[44]

Fig. 9 Diagrams of Rb/Y – Nb/Y (a) and Nb/Zr – Th/Zr (b) for Zhushan metagabbros from Yilan

研究区变辉长岩具有相对低的 Mg#值（47 ~ 51），SiO_2 含量变化相对较大（47.59% ~ 52.25%），在野外露头上可以看到辉长岩呈现灰黑–灰–浅灰的颜色变化，指示其岩浆在演化过程中可能发生了分离结晶作用。从变辉长岩的哈克图解（图 10）中可以看出，随着 MgO 含量增加，Ni 含量增加（图 10h），Al_2O_3 含量降低（图 10g），说明可能存在橄榄石的分离结晶；P_2O_5、Sr 含量随着 MgO 含量的增加而降低（图 10e、i），暗示可能存在斜长石的分离结晶作用，这也得到了微量元素蛛网图（图 7b）上 P、Sr 和 Eu 亏损的印证；此外，FeO、Fe_2O_3、CaO、MnO_2 和 Ni 与 MgO 呈现很好的正相关趋势（图 10a、b、c、d、f、j），可能指示了有辉石、橄榄石、钛铁矿和钙长石等富含铁镁钙的矿物的分离结晶。

4.3 地质意义

二叠纪岩浆作用在黑龙江东部广为发育[6,19,45-48]，但是关于这些二叠纪岩石的形成环境一直存在着较大的争议。吴福元等[19]对佳木斯地块西缘柴河、楚山和石场等岩体进行研究，认为这些二叠纪花岗岩的形成可能与佳木斯地块与周围块体或佳木斯地块内部块体间的拼合作用有关。Meng et al.[49]在松嫩地块东缘张广才岭识别出一套晚二叠世双峰式火山岩，反映它们可能形成于古大洋板块向西俯冲过程中的弧后盆地环境。最近，Zhou et al.[6]通过对依兰地区蓝片岩的研究提出二叠纪时佳木斯地块西缘处于一种裂谷环境。本文研究的变辉长岩处于佳木斯地块和松嫩地块的过渡区域，研究其可为上述争议问题提供很好的制约。

依兰珠山辉长岩具有高 Al_2O_3 含量，属于钙碱性系列，富集大离子亲石元素和亏损高场强元素，这些地球化学特征均与活动大陆边缘岩浆岩特点相似。研究区变辉长岩是俯冲流体交代地幔楔的产物，暗示其形成于俯冲环境。在一系列构造判别图解（图 11）中，所有样品均落入到大陆弧区域。因此，可以认为研究区晚二叠世辉长岩形成于俯冲机制下的活动大陆边缘环境，而非裂谷背景。依兰蓝片岩的原岩时代与珠山辉长岩的结晶年龄相似，

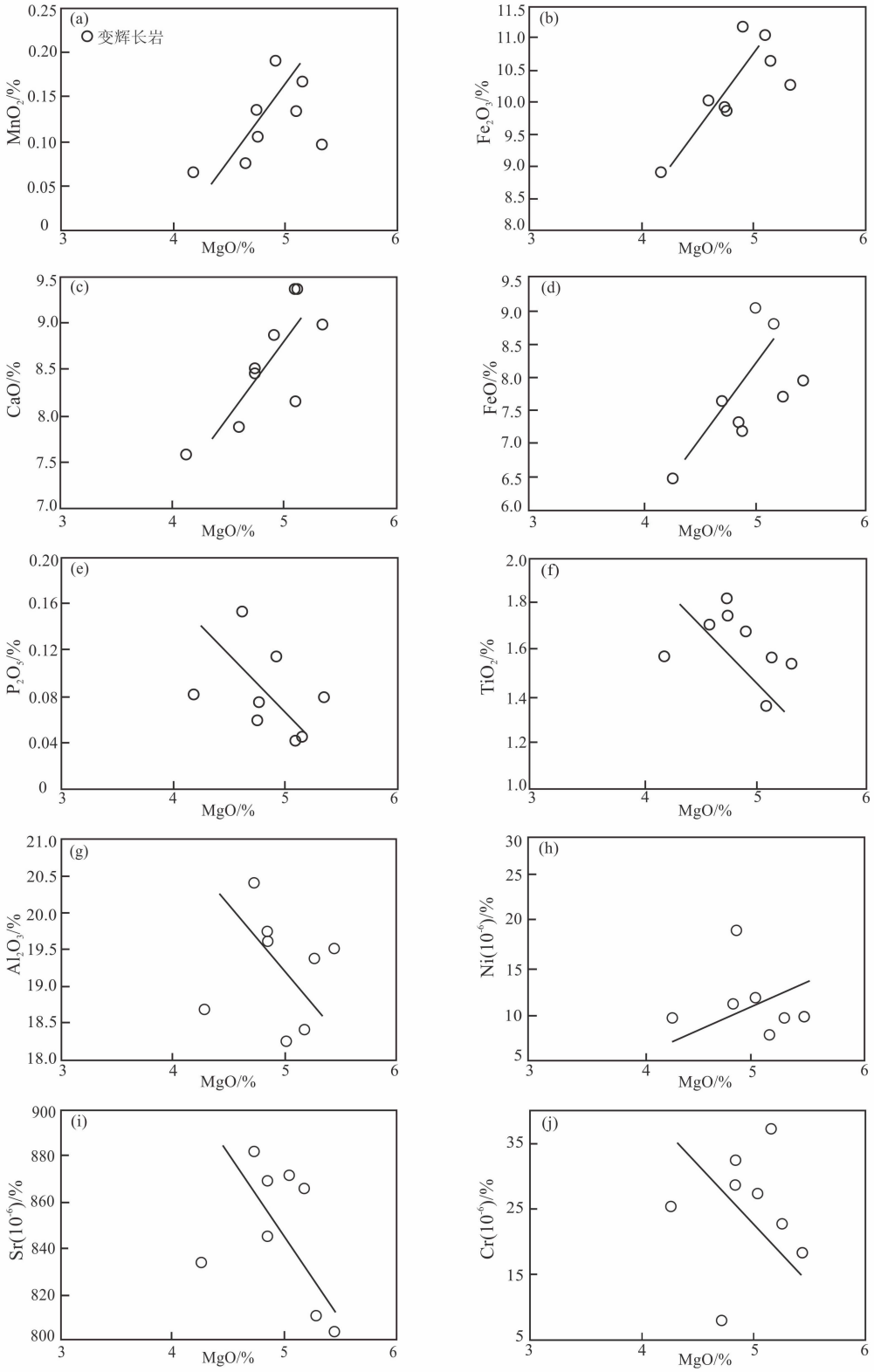
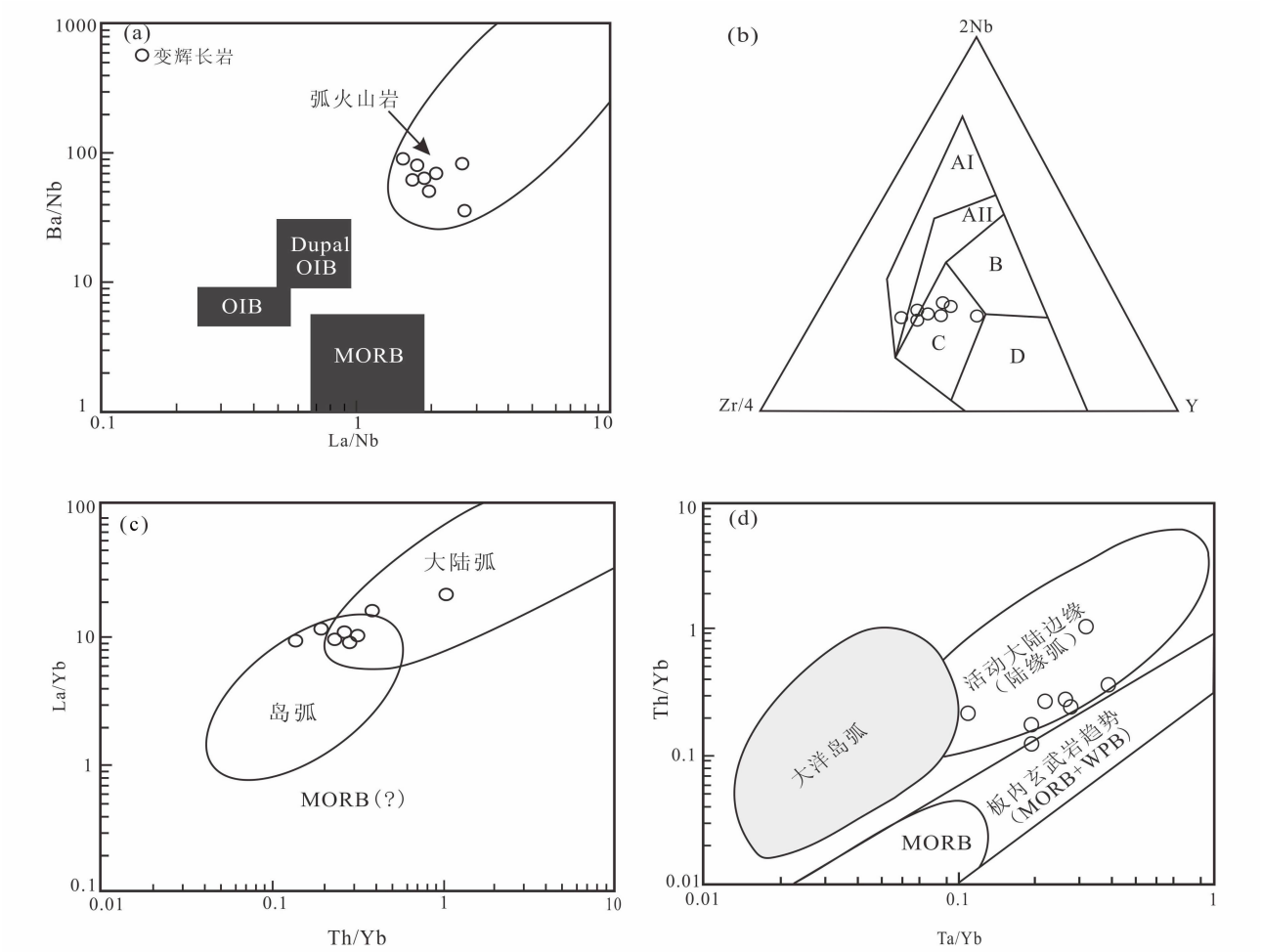


图 10　依兰珠山变辉长岩的哈克图解

Fig. 10　Harker diagrams for Zhushan metagabbros from Yilan



AI. 板内钙碱性玄武岩；AII. 板内钙碱性和拉斑玄武岩；B. 富集的洋中脊玄武岩；C. 板内拉斑和火山弧玄武岩；D. 正常的洋中脊玄武岩和火山弧玄武岩.

图 11 依兰珠山变辉长岩的 La/Nb – Ba/Nb 图解（a）[50]、2Nb – Zr/4 – Y 图解（b）[51]、La/Yb – Th/Yb 图解（c）[52] 和 Th/Yb – Ta/Yb 图解（d）[53]

Fig. 11 Diagrams of La/Nb – Ba/Nb (a), 2Nb – 4/Zr – Y (b), La/Yb – Th/Yb (c) and Th/Yb – Ta/Yb (d) for Zhushan metagabbros from Yilan

地球化学特征显示其具有 OIB 属性，暗示其最可能形成于靠近活动大陆边缘的洋岛环境。同时，松嫩地块东缘和佳木斯地块西缘分布大量二叠纪弧性质的火成岩，它们呈近 NS 向展布，表明当时应该存在一个双向俯冲的古大洋板块。综上，笔者认为依兰珠山变辉长岩形成于大陆弧环境，佳木斯地块与松嫩地块在二叠纪前还未碰撞拼合。

5 结论

（1）黑龙江省东部依兰珠山变辉长岩形成于晚二叠世，其锆石加权平均年龄为（256 ± 3）Ma。

（2）珠山变辉长岩具有钙碱性玄武岩的地球化学属性，其原始岩浆起源于俯冲流体交代地幔楔的部分熔融，在岩浆演化过程中经历了强烈的分离结晶作用。

（3）佳木斯地块西缘在晚二叠世期间处于俯冲环境，即佳木斯地块与松嫩地块在当时尚未碰撞拼合。

致谢 衷心感谢吉林大学实验室和核工业北京地质研究院分析测试中心在锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年、全岩主量元素和微量元素测试分析中给予的帮助，感谢河北省廊坊市宇能矿物分选有限公司在锆石分选过程中给予的支持。

参考文献：

[1] 刘静兰. 佳木斯中间地块前寒武纪地质研究 [J]. 长春地质学院学报, 1988, 18 (2): 148-102.
LIU Jing-lan. Precambrian geology of the Jiamusi block [J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1988, 18 (2): 148-102.

[2] 刘静兰. 佳木斯中间地块绿岩带特征及其大地构造环境浅析 [J]. 黑龙江地质, 1991, 2 (1): 33-49.
LIU Jing-lan. Analysis of characteristics of greenstone belt of Jiamusi median massif and its geotectonic setting [J]. Heilongjiang Geology, 1991, 2 (1): 33-49.

[3] 曹熹, 党增欣, 张兴洲, 等. 佳木斯复合地体 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992: 1-224.
CAO Xi, DANG Zeng-xin, ZHANG Xing-zhou, et al. Composite terrane of Jiamusi terrane [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1992: 1-224.

[4] 李锦轶. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识 [J]. 地质论评, 1998, 44 (4): 339-348.
LI Jin-yi. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas [J]. Geological Review, 1998, 44 (4): 339-348.

[5] Wu F Y, Yang J H, Lo C H, et al. The Heilongjiang Group: a Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China [J]. Island Arc, 2007, 16: 156-172.

[6] Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z. The onset of Pacific margin accretion in NE China: evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt [J]. Tectonophysics, 2009, 478: 230-246.

[7] Zhu C Y L, Zhao G C, Sun M, et al. Geochronology and geochemistry of the Yilan blue schists in the Heilongjiang complex, northeastern China and tectonic implications [J]. Lithos, 2015 (216/217): 241-253.

[8] Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. Nature, 1993, 364: 299-307.

[9] Yu Q, Ge W C, Yang H, et al. Petrogenesis of Late Paleozoic volcanic rocks from the Daheshen Formation in central Jilin Province, NE China, and its tectonic implications: constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes [J]. Lithos, 2014 (192/195): 116-131.

[10] Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: chronology, geochemistry, and tectonic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34 (3): 392-402.

[11] Xu W L, Pei F P, Wang F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 74: 167-193.

[12] Yu J J, Wang F, Xu W L, et al. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry [J]. Lithos, 2012 (142/143): 256-266.

[13] Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Early-Middle Triassic magmatism in the Argun Massif, NE China: constraints on the tectonic evolution of Mongol-Okhotsk Ocean [J]. Lithos, 2013 (184/187): 1-16.

[14] Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Early Mesozoic southward subduction history of the Mongol-Okhotsk oceanic plate: evidence from geochronology and geochemistry of Early Mesozoic intrusive rocks in the Erguna Massif, NE China [J]. Gondwana Research, 2013, 31: 218-240.

[15] 姜继圣. 麻山群孔兹岩系地层新见 [J]. 地层学杂志, 1992, 16 (4): 304-311.
JIANG Ji-sheng. Discovery of the khondalite series in the Mashan Group [J]. Journal of Stratigraphy, 1992, 16 (4): 304-311.

[16] 卢良兆, 徐学纯. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系 [M]. 长春: 长春出版社, 1996: 2-4.
LU Liang-zhao, XU Xue-chun. Early Precambrian khondalite series in northern China [M]. Changchun: Changchun Press, 1996: 2-4.

[17] Wilde S A, Dorsett-Bain H L, Liu J L. The identification of a Late Pan-African granulite facies event in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon dating of the Mashan Group at Liumao, Heilongjiang Province, China [C] //Proceedings of the 30th IGC: Precambrian Geology and Metamorphic Petrology, VSP International, 17. Amsterdam: Science Publishers, 1997: 59-74.

[18] Wilde S A, Zhang X Z, Wu F Y. Extension of a newly-identified 500 Ma metamorphic terrain in Northeast China: further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan complex, Heilongjiang Province, China [J]. Tectonophysics, 2000, 328: 115-130.

[19] 吴福元, Wilde S A, 孙德有. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄 [J]. 岩石学报,

2001, 17 (4): 43-52.
WU Fu-yuan, Wilde S A, SUN De-you. Zircon SHRIMP ages of gneissic granites in Jiamusi Massif, northeastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17 (4): 443-452.

[20] 吴福元, 曹林. 东北亚地区的若干重要基础地质问题 [J]. 世界地质, 1999, 18 (2): 1-13.
WU Fu-yuan, CAO Lin. Some important problems of geology in northeastern Asia [J]. Global Geology, 1999, 18 (2): 1-13.

[21] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. Journal of Asian Earth Science, 2011, 41: 1-30.

[22] Bi J H, Ge W C, Yang H, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Paleozoic granitic magmatism in the Jiamusi Massif, NE China: geochronological, geochemical and Hf isotopic evidence [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 96: 308-331.

[23] 于介江, 侯雪刚, 葛文春, 等. 佳木斯地块东北缘早二叠世六连岩体的岩浆混合成因: 岩相学、年代学和地球化学证据 [J]. 岩石学报, 2013, 29 (9): 2971-2986.
YU Jie-jiang, HOU Xue-gang, GE Wen-chun, et al. Magma mixing genesis of the Early Permian Liulian pluton at the northeastern margin of the Jiamusi massif in NE China: evidences from petrography, geochronology and geochemistry [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29 (9): 2971-2986.

[24] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 8-585.
Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 8-585.

[25] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.

[26] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed igneous rocks [J]. Earth Planet Science Letters, 1976, 45: 326-336.

[27] Miyashiro A. Volcanic rocks series in island arcs and active continental margins [J]. American Journal of Science, 1974: 274 (4): 321-355.

[28] Cabanis B, Lecolle M. The La/10-Y/15-Nb/8 diagram-a tool for discrimination volcanic series and evidencing continental-crust magmatic mixtures and or contamination [J]. Comptes Rendus de Academie des Sciences II, 1989, 309: 2023-2029.

[29] Marjorite W. Igneous petrogenesis [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1191-225.

[30] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1979, 69 (1): 33-47.

[31] Taylor S R, Rudnick R L, McLennan S M, et al. Rare element patterns in Archean high-grade metasediments and their tectonic significance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50 (10): 2267-2279.

[32] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society of Special Publication, 1989, 42: 313-345.

[33] Henderson P R. Rare earth element geochemistry [M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 467-499.

[34] 蒲建彬, 张兴洲, 郭冶, 等. 佳木斯地块东部二叠纪方山花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. 世界地质, 2015, 34 (4): 903-911.
PU Jian-bin, ZHANG Xing-zhou, GUO Ye, et al. Geological implications of Permian Fangshan granitic rocks in eastern Jiamusi Massif: evidences from U-Pb chronology and geochemistry [J]. Global Geology, 2015, 34 (4): 903-911.

[35] 王枫. 黑龙江省东部张广才岭群新兴组: 岩石组合、时代及其构造意义: 硕士学位论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
WANG Feng. The Xinxing Formation from Zhangguangcai Range Group in eastern Heilongjiang Province: rock association, geochronology and tectonic implications: master's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University, 2011.

[36] 于倩, 葛文春, 杨浩, 等. 张广才岭五道岭组火山岩的锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征 [J]. 世界地质, 2013, 32 (4): 707-715.
YU Qian, GE Wen-chun, YANG Hao, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of volcanic rocks from Wudaoling Formation in Zhangguangcai Range [J]. Global Geology, 2013, 32 (4): 707-715.

[37] 孙晓, 郭支涛, 窦鲁文, 等. 黑龙江尚志一面坡固安屯组火山碎屑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和岩石化学特征 [J]. 世界地质, 2016, 35 (1): 28-39.

SUN Xiao, GUO Zhi-tao, DOU Lu-wen, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of volcano clastic rocks in Gu'antun Formation of Yimianpo of Shangzhi, Heilongjiang Province [J]. Global Geology, 2016, 35 (1): 28-39.

[38] Frey F A, Prinz M U. Ultramafic inclusions from San Carlos, Arizona: petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38 (1): 129-176.

[39] Ji W Q, Xu W L, Yang D B, et al. Chronology and geochemistry of volcanic rocks in the Cretaceous Suifenhe Formation in eastern Heilongjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (2): 266-277.

[40] Ionov D A, Gregoire M, Prikhodko V S. Feldspar-Ti-oxide metasomatism in off-cratonic continental and oceanic upper mantle [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 165 (1): 37-44.

[41] Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. Chemical Geology, 1999, 157: 119-146.

[42] Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics [M]. New York: Springer Verlag, 1981: 385.

[43] Laflèche M R, Camire G, Jenner G A. Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalen islands, Quebec, Canada [J]. Chemical Geology, 1998, 148: 115-136.

[44] Kepezhinskas P, Mcdemott F P, Defant M J, et al. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka arc petrogenesis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61 (3): 577-600.

[45] Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Pale-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26: 207-224.

[46] 宋彪, 牛宝贵, 李锦轶, 等. 牡丹江—鸡西花岗岩类地质同位素年代学研究 [J]. 岩石矿物学志, 1994, 13 (4): 204-213.
SONG Biao, NIU Bao-gui, LI Jin-yi, et al. Isotope geochronology of granitoids in Mudanjiang-Jixi area [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1994, 13 (4): 204-213.

[47] Pei F P, Xu W L, Yang D B, et al. Zircon U-Pb geochronology of basement metamorphic rocks in the Songliao Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (7): 942-948.

[48] 黄映聪, 任东辉, 张兴洲, 等. 黑龙江省东部桦南隆起美作花岗岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38 (4): 631-638.
HUANG Ying-cong, REN Dong-hui, ZHANG Xing-zhou, et al. Zircon U-Pb dating of granite in Huanan uplift eastern part of Heilongjiang Province and its geological significance [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38 (4): 631-638.

[49] Meng E, Xu W L, Pei F P, et al. Permian bimodal volcanism in the Zhangguangcai Range of eastern Heilongjiang Province, NE China: zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemical evidence [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41: 119-132.

[50] 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究 [J]. 岩石学报, 2005, 21 (3): 947-953.
LIU Shen, HU Rui-zhong, ZHAO Jun-hong, et al. Geochemical characteristics and petrogenetic investigation of the Late Mesozoic lamprophyres of Jiaobei, Shandong Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (3): 947-953.

[51] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. Chemical Geology, 1986, 56: 207-218.

[52] Condie K C, Crow C. Early Precambrian within-plate basalts from the Kaapvaal Craton in Southern-Africa: a case for crustally contaminated komatiites [J]. The Journal of Geology, 1990, 98 (1): 100-107.

[53] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [C] // Hawkesworth C J, Norry M J. Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Nantwich: Shiva Publications, 1983: 230-249.