文章编号：1004—5589（2016）04—0942—13

黑龙江饶河枕状玄武岩地质、地球化学特征及其构造属性

何松，孙晓猛，张旭庆，万阔，郑涵，李多姿

吉林大学 地球科学学院，长春 130061

摘要： 为了确定饶河玄武岩的构造属性，在野外地质观察的基础上，对玄武岩进行岩石学研究和地球化学分析。玄武岩具有典型的枕状构造、淬冷边、中空骸晶和鬣刺结构等特征，反映其形成于海底喷发环境。化学分析样品具有高 TiO_2、MgO 和低 Al_2O_3、CaO、P_2O_5、K_2O 等特征，富集大离子亲石元素（Rb、Sr 和 Ba），微量元素蛛网图呈向上隆起形态，稀土元素配分曲线为右倾型（∑LREE/∑HREE为 5.8～6.5），无 δEu 异常（0.92～0.97），表明样品具有洋岛玄武岩特征。主量和微量元素构造环境判别图指示了样品形成于洋岛或板内环境。样品与亚速尔型和夏威夷型洋岛玄武岩地球化学特征对比，表现出明显的夏威夷型洋岛玄武岩特征。岩石源区分析揭示出岩浆具有地幔热柱起源，并有先期交代地幔熔体的混入，岩浆源区还受壳幔循环的影响。研究表明，饶河枕状玄武岩为夏威夷型洋岛玄武岩，形成于洋壳消减阶段的洋中脊轴外板内喷发环境，为饶河地区存在成熟的洋盆提供直接证据。结合区域研究成果，认为饶河地区经历了古太平洋板块的扩张、洋中脊轴外板内地幔柱上涌、洋壳俯冲消减以及向佳木斯地块仰冲增生的构造演化过程。

关键词： 饶河；枕状玄武岩；洋岛；夏威夷型洋岛；黑龙江省

中图分类号： P588.145；P595 **文献标识码：** A **doi：** 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.04.004

Geological and geochemical characteristics of Raohe pillow basalts of Heilongjiang Province and its tectonic implication

HE Song，SUN Xiao-meng，ZHANG Xu-qing，WAN Kuo，ZHENG Han，LI Duo-zi

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

Abstract: Based on field geological investigation，petrological research and geochemical analysis are carried on to confirm the tectonic implication of the Raohe basalt. The studies indicate that the basalt has typical characteristics of pillow structure，quenching rim，intermediate hollow skeletal and spinifex textures，revealing that they are formed in the environment of submarine eruption. The analysis samples show geochemical features of high TiO_2，MgO and low Al_2O_3，CaO，P_2O_5 and K_2O，and are enriched in large ion lithophile elements（Rb，Sr and Ba）. While the trace element spider diagram shows a upward type，and the REE diagram shows a right deviation（∑LREE/∑HREE is 5.8～6.5）without δEu anomaly（0.92～0.97），indicating the characteristics of ocean island basalts. Tectonic discrimination diagrams of major and trace element reveal that they are formed in the oceanic island and intra-plate setting. Compared with the geochemical characteristics of Azores-type and Hawaii-type oceanic island，the samples show the significant characteristics of Hawaii-type ocean island. The studies of source and petrogenesis suggest the samples derivated from mantle source，added melting metasomatic mantle，and influenced

收稿日期： 2015-11-13；**改回日期：** 2016-06-23

基金项目： 中国地质调查局项目（12120113098100）与国家973项目火山岩油气藏形成机制和分布规律（2009CB219305）联合资助.

通讯作者： 孙晓猛（1954-），男，教授，博士生导师，主要从事区域、盆地构造和成矿规律研究. E-mail：sunxiaomeng5210@163.com

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

by the circulation between mantle and crust. The results implied that the Raohe pillow basalt belongs to Hawaii-type ocean island basalt, and formed in the intra-plate setting of off-axis volcanism during the stage of oceanic crustal consumption, providing direct evidence to the existence of mature ocean basin in the Raohe area. Combining with the regional geological research, the authors suggest that the Raohe area experienced tectonic evolution of the paleo-Pacific plates expansion, mantle plume upwelling in the intra-plate setting of off-axis, oceanic crustal consumption, obduction-accretion with Jiamusi Massif.

Key words: Raohe; pillow basalt; oceanic island; Hawaii-type oceanic island; Heilongjiang Province

0　引言

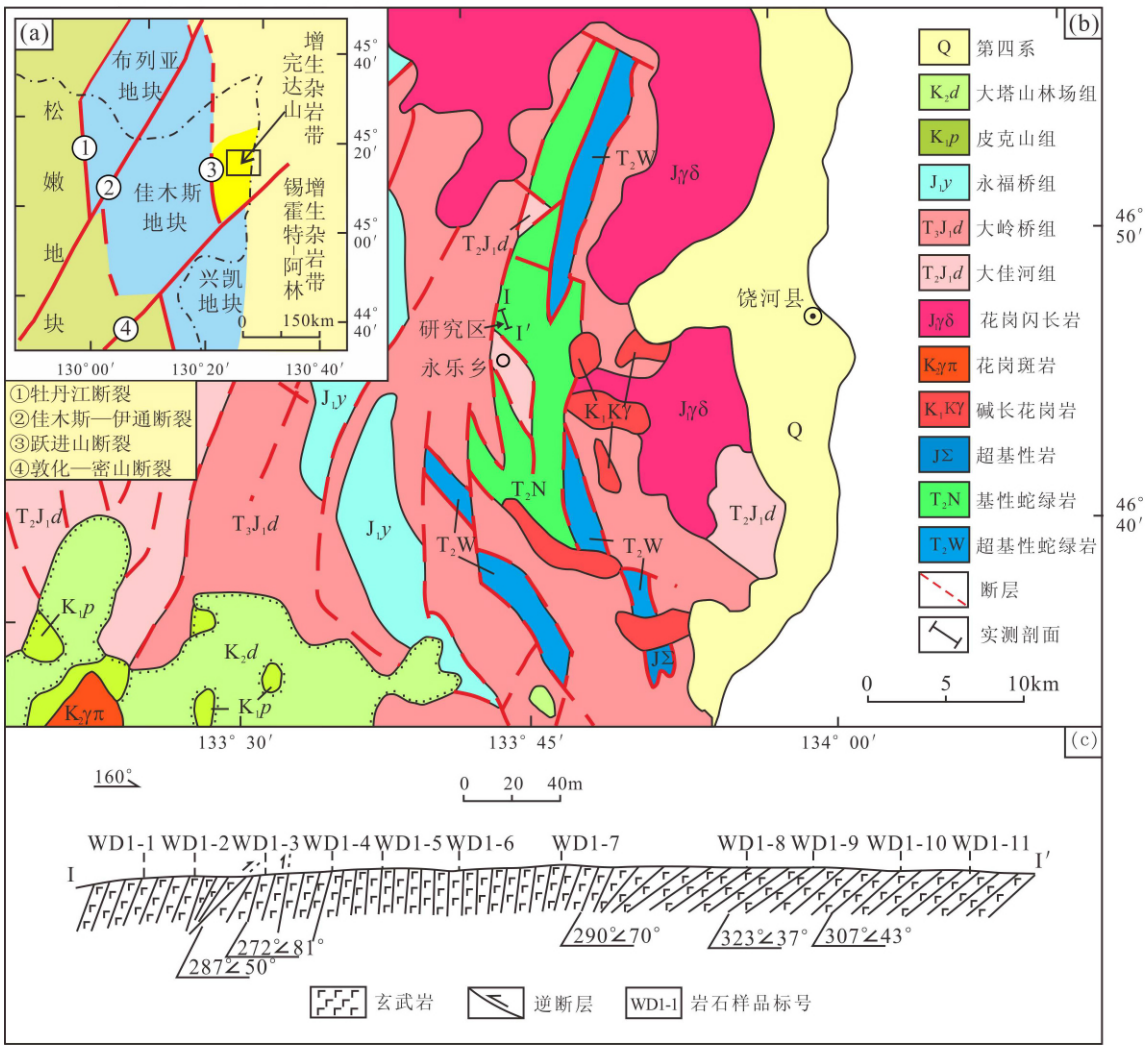
饶河枕状玄武岩分布于黑龙江省饶河市永乐乡附近，在大地构造位置上位于黑龙江中小地块群以东的完达山增生杂岩带（前人亦称之为完达山地体或那丹哈达地体）中（图 1）。完达山增生杂岩带的研究始于 20 世纪 50 年代，其构造属性先后被认为是褶皱带、地槽区、板块俯冲带、地体和弧后边缘海等[1-8]。20 世纪 80 年代之后，一些学者通过对放射虫组合、古生态以及古地磁的研究，揭示出完达山地区、锡霍特阿林地区和日本美浓地区曾属于同一个超级地体，该地体起源于赤道附近，从晚三叠世至早白垩世初向中高纬度进行长距离漂移[1,2,4,7,9-19]。一些学者通过放射虫形成时代、饶河堆晶辉长岩、枕状玄武岩以及侵入到增生杂岩中的花岗岩年代学研究，限定了完达山增生杂岩带与佳木斯地块拼贴的时代为晚侏罗世—早白垩世[7,11,12,20-23]。此外，还有一些学者开展了增生杂岩带中枕状玄武岩的构造属性研究，如有人认为枕状玄武岩是蛇绿岩的组成部分，属于俯冲带附近的小型扩张中心形成的次生洋壳[24]；但大部分人则根据枕状玄武岩的地球化学特征，认为其形成于洋岛环境[23,25-27]。上述研究对于确定完达山地区的构造属性及其构造演化起着十分重要的作用。然而，迄今，尚未有人对洋岛类型进行划分和系统研究，而洋岛类型的确定，直接关系到洋盆规模的分析及对洋盆构造演化的深入理解，所以在进行与洋岛相关的洋盆演化分析过程中，必须首先区分洋岛的类型，才能得出正确的结论。因此，选择饶河市永乐乡附近的枕状玄武岩为研究对象，对其进行地质和地球化学特征分析，在确定饶河枕状玄武岩所代表的洋岛类型的基础上，进一步揭示洋岛形成时的源区特征和洋岛形成的构造背景，为恢复完达山增生杂岩带所经历的古太平洋板块演化过程提供重要的地质依据。

1　地质背景与样品特征

完达山地区是中国东部中生代深海相地层最为发育的地区。该区由老至新主要分布 4 套地层：石炭—二叠系以石灰岩为主，主要产于二联桥附近，石灰岩中含有石炭—二叠纪的筵和珊瑚[4,7,12,14]，古生物古生态特征表明，它们产于低纬度温暖特提斯水域之中[14]；中三叠统—中侏罗统由放射虫硅质岩和砂页岩组成，其中含有深海锰结核，代表了远洋-深海相沉积。硅质岩中放射虫由老至新具有从低纬度温水型向中高纬度冷水型过渡的特点[20,28]；晚侏罗世—早白垩世发育了一套浅海相地层，即东安镇组，含有以 *Buchia*（雏蛤）为代表的北方型浅海动物群[29-35]；下白垩统皮克山组呈角度不整合覆盖在增生杂岩带之上。除了沉积地层之外，完达山地区还分布由橄榄岩、辉石橄榄岩、角闪辉石岩、堆晶辉长岩、辉绿岩、斜长岩、玄武岩、枕状玄武岩等组成的超镁铁质-镁铁质杂岩带，它们主要出露于杂岩带的东部和西南角（图 1），呈近南北向展布。三叠系—中侏罗统硅质岩和砂页岩卷入了强烈的构造变形，不同时代和不同性质的岩石相互混杂，组成了典型的构造混杂岩[7,12,36]，混杂岩又被早白垩世花岗岩、花岗闪长斑岩和石英闪长玢岩所侵入[21,37]。

枕状玄武岩出露在增生杂岩带东部的饶河县永乐乡附近，GPS 坐标 46°47′56.9″N，133°45′04.4″E（图 1b）。笔者对这套玄武岩进行了实测剖面研究（图 1c，图 2a）。玄武岩枕状构造十分发育（图 2b），具有明显的放射状裂隙、淬冷边和呈同心环状分布的气孔。岩石具有斑状结构和间粒间隐结构。斑晶由普通辉石、透辉石、斜长石和少量橄榄石组成，基质由斜长石、辉石和玻璃质组成，表现出拉斑玄武岩特征。条状斜长石中间呈空心状

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 吉黑东部及俄罗斯远东地区大地构造单元划分图; (b) 黑龙江省饶河地区地质图; (c) 研究区枕状熔岩剖面图(示采样位置)

图 1 黑龙江饶河地区地质及大地构造背景图

Fig. 1 Geology and tectonic background of Raohe area, Heilongjiang Province

(多已被绿泥石或玻璃质充填),其边部具有明显的锯齿状,构成中空骸晶结构(图 2c)。一些标本中辉石呈针柱状,集合体呈放射状分布,边缘为不明显的锯齿状,与科马提岩的鬣刺结构相同(图 2d)。中空骸晶结构和鬣刺结构反映了枕状玄武岩是在水下急剧淬火的环境中形成的。

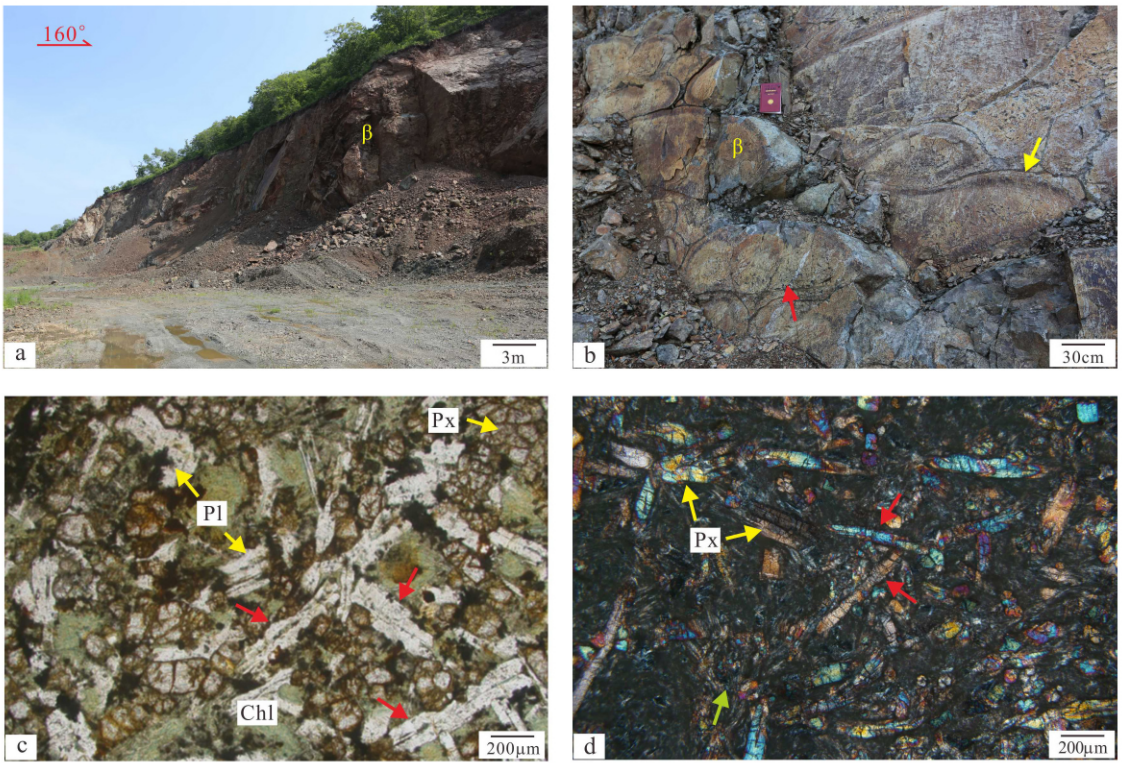
2 地球化学特征

为保证测试分析的准确性,笔者在实测剖面中系统采集没有遭受到明显风化和蚀变作用的枕状玄武岩样品,尤其注意采集没有杏仁构造的样品,在显微镜下仔细观察,筛选出 5 件样品进行地球化学分析。

2.1 分析方法

主量元素和微量元素分析均在吉林省第五地质调查所综合岩矿测试中心完成。样品用纯水洗净后,采用颚式破碎机初碎,再用玛瑙无污染球磨机将样品研磨至 200 目。主量元素采用原子吸收分光光度计分析,FeO 和 Al_2O_3 采用传统湿化学方法进行分析;微量元素的分析则采用电感耦合等离子质谱(XSERIES-2 ICP-MS)分析方法。对标样的分析结果表明,主量元素分析精度和准确度优于

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 枕状玄武岩野外宏观特征; (b) 红色箭头指示玄武岩枕状构造，黄色箭头指示淬冷边; (c) 红色箭头指示边部呈不规则锯齿状斜长石的中空骸晶结构(单偏光镜下); (d) 红色箭头指示具鬣刺结构的针柱状辉石，绿色箭头指示针柱状辉石集合体呈放射状分布特征(正交偏光镜下); β－玄武岩，Pl－斜长石，Px－辉石，Chl－绿泥石.

图 2　饶河枕状玄武岩野外及镜下特征

Fig. 2　Field and microscopic characteristics of Raohe pillow basalts

5%，微量元素分析精度和准确度优于 10%。样品的主量和微量元素分析结果见表 1。

2.2　主量元素

样品中除 WD1-6 SiO_2 含量过高外(可能是后期石英细脉贯入造成)，其他样品 SiO_2 含量为 51% ~ 52%。具有高 TiO_2 (2.02% ~ 2.41%)、MgO (9.90% ~ 10.82%) 和低 Al_2O_3 (10.66% ~ 11.50%)、CaO(4.58% ~ 5.31%)、P_2O_5(0.25% ~ 0.30%)和 K_2O (0.37% ~ 1.04%) 等特征。样品全铁含量较高，w(TFeO) 平均为 11.7% 。w(FeO) > w(Fe_2O_3)，表明后期蚀变及氧化作用不是造成全铁含量偏高的主要原因。在 TAS 图解中(图 3a)，全部样品均落入亚碱性系列，除样品 WD1-6 落入玄武安山岩外，其余样品全部落入玄武岩区。在 AFM 图解中(未附图)，样品落在拉斑玄武岩区。在 (TFeO) /MgO - TiO_2 图解(图 3b) 中，样品全部落入洋岛玄武岩 (OIB) 区; 在 TiO_2 - MnO - P_2O_5 三角判别图解(图 3c) 中，样品落入洋岛拉斑玄武岩 (OIT) 区。与洋中脊玄武岩 (MORB)、岛弧拉斑玄武岩 (IAT)、OIT 和洋岛碱性玄武岩 (OIA) 相比，样品主量元素平均含量总体上接近于 OIT (表 1)。

2.3　微量元素

根据枕状玄武岩微量元素分析结果 (表 1) 绘制了微量元素亏损型洋中脊玄武岩 (N-MORB) 标准化蛛网图 (图 4a)。图中除了 Th、Nb 和 Hf 出现异常外。整体表现出大离子亲石元素 (Rb、Sr 和 Ba) 富集特征，曲线呈上隆形态，与 OIB 趋势一致，明显有别于岛弧玄武岩 (IAB)。此外，Ce、P、Zr、Ti、Y 和 Yb 等高场强元素与板内玄武岩 (WPB) 标准模式曲线几乎相同，这些高场强元素在蚀变、变质过程中活动性较小，往往保持原岩特征，可以较好地反映岩浆演化规律和成因过程[40-43]。图中 Rb 和 Ba 含量表现为峰值，Yb 含量

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 饶河枕状玄武岩主量元素（%）、微量元素（10^{-6}）地球化学分析结果

Table 1 Major element and trace element contents in Raohe pillow basalts

样号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	MnO	TiO_2	P_2O_5	LOI	总和
WD1–1	51.26	11.20	4.68	7.80	0.38	3.02	5.31	10.40	0.18	2.02	0.30	3.50	100.05
WD1–5	51.40	11.50	4.79	8.10	1.04	2.73	5.04	9.90	0.18	2.24	0.25	2.99	100.16
WD1–6	56.94	10.66	3.62	6.61	0.68	3.48	4.58	8.71	0.14	1.68	0.20	2.44	99.74
WD1–9	51.48	10.82	5.04	7.50	0.37	2.90	4.95	10.82	0.18	2.15	0.29	3.44	99.94
WD1–11	51.28	10.49	5.04	7.92	0.54	3.45	5.25	10.33	0.17	2.41	0.28	3.05	100.21
平均值	52.47	10.93	4.63	7.59	0.60	3.12	5.03	10.03	0.17	2.10	0.26	3.08	100.01
MORB	50.50	15.30	10.40	0.20	2.70	11.30	7.60	0.20	1.60	0.20	2.63	100.00	
IAT	51.10	16.10	11.80	0.40	1.96	10.80	5.10		0.83		2.59	98.09	
OIT	50.40	13.30	11.70	0.44	2.26	10.50	8.02	0.17	2.46	0.26	2.54	99.51	
OIA	46.30	13.10	11.70	1.40	2.57	11.20	9.24	0.17	3.20	0.57	2.50	99.45	

样号	Sr	K	Rb	Ba	Th	Nb	Ce	P	Zr	Hf	Sm	Ti	Y	Yb
WD1–1	387.8	3 153	5.6	105.8	16.6	3.1	43.45	1 308	162.7	1.0	5.88	14 546	31.5	1.51
WD1–5	339.5	8 630	14.5	234.1	8.9	1.0	47.36	872	171.1	1.0	6.53	15 249	34.7	1.84
WD1–6	286.7	5 643	16.3	167.0	16.5	1.0	43.09	872	177.8	3.2	5.85	12 806	33.2	1.87
WD1–9	321.1	3 070	7.2	116.0	1.0	1.1	51.45	1 264	152.5	1.5	7.49	16 583	37.4	1.67
WD1–11	372.2	4 481	11.7	110.2	12.2	1.8	51.87	1 221	156.8	1.0	7.15	16 813	30.9	1.61

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
WD1–1	17.55	43.45	5.60	24.87	5.88	1.69	5.13	0.90	4.57	0.88	1.66	0.30	1.51	0.25
WD1–5	18.92	47.36	6.17	27.55	6.53	1.98	5.76	1.00	5.11	0.99	3.00	0.35	1.84	0.31
WD1–6	17.50	43.09	5.58	24.80	5.85	1.71	5.15	0.97	4.72	0.96	2.82	0.35	1.87	0.31
WD1–9	22.27	51.45	7.16	32.05	7.49	2.15	6.51	1.11	5.46	1.02	2.51	0.34	1.67	0.28
WD1–11	20.77	51.87	6.69	30.34	7.15	2.12	6.22	1.08	5.34	1.01	2.64	0.32	1.61	0.27

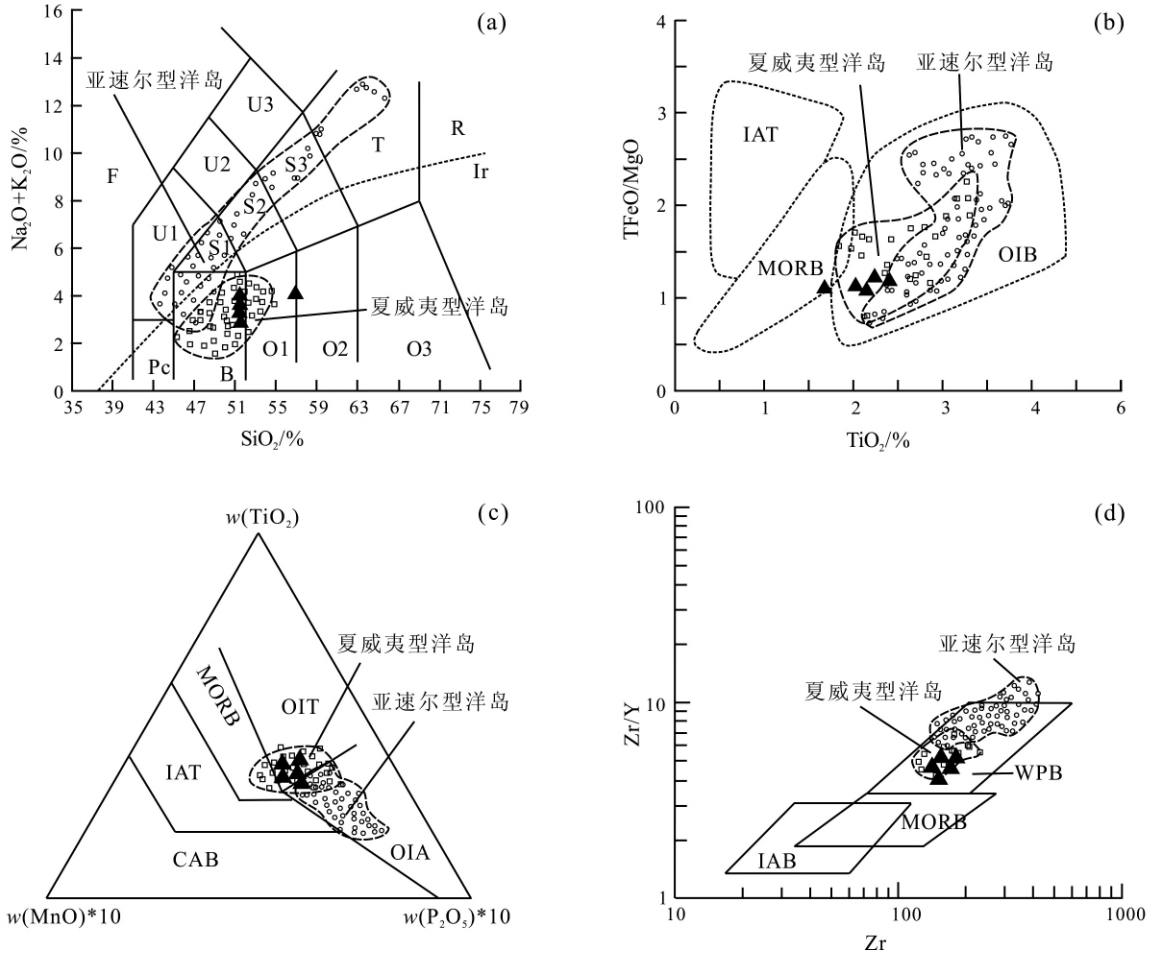
注：由吉林省第五地质调查所综合岩矿测试中心进行测试，2011.09.23.

最低，也表现出 WPB 的特征[44]。Th 元素丰度较高，反映了岩石具有地幔柱起源特征[45]。至于 Hf 异常，可能与源区不均一和部分熔融程度有关[46]。图 4a 中，亚速尔型 OIB 的 Sr、K、Rb、Ba、Ce、P 和 Zr 元素丰度明显高于夏威夷型，而样品与夏威夷型的微量元素丰度曲线保持一致性。微量元素 N–MORB 标准化蛛网图表明样品应形成于板内洋岛环境，且很可能与夏威夷型玄武岩形成的构造背景一致。

在火山岩研究中，不相容微量元素的丰度比值及其图解是判别大地构造环境的重要地球化学参数[44,47,48]。样品中 TiO_2/Y 比值较高，平均 630，与 WPB 类似（N–MORB 为 270～400，E–MORB 为 400～562，WPB > 562[49]，表明样品具有 WPB 的特征；样品的 Ti/Y（平均 454）和 Zr/Y（平均 4.9）值也显示了具有 OIB 特征[50]。在 Zr/Zr–Y 判别图解中饶河枕状玄武岩落入夏威夷型 OIB 分布区的中部（图 3d），揭示出饶河枕状玄武岩具有夏威夷型 OIB 特征。

前人研究表明，不同构造环境中的玄武岩稀土配分模式存在一定的变化规律[51]，从 OIB 到富集型洋中脊玄武岩（E–MORB）再到 N–MORB，玄武岩稀土的总量呈下降趋势，稀土配分也从轻稀土富集型转变为亏损型。笔者根据饶河地区枕状玄武岩稀土元素分析结果（表 1）绘制了稀土元素球粒陨石标准化配分模式图（图 4b），图中显示，稀土配分模式呈右倾型，稀土总量相对较大（平均 127.08×10^{-6}），配分曲线明显高于 E–MORB 和 N

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) (Na_2O+K_2O) /SiO_2 判别图; (b) TFeO/MgO – TiO_2 判别图; (c) TiO_2 – MnO – P_2O_5 判别图; (d) Zr/ Y – Zr 判别图。MORB – 洋中脊玄武岩, IAB – 岛弧玄武岩, IAT – 岛弧拉斑玄武岩, CAB – 钙碱性玄武岩, OIB – 洋岛玄武岩, OIT – 洋岛拉斑玄武岩, OIA – 洋岛碱性玄武岩, WPB – 板内玄武岩。亚速尔型和夏威夷型洋岛玄武岩地球化学数据见文献 [38, 39].

图 3　饶河地区枕状玄武岩地球化学判别图

Fig. 3　Geochemical diagrams of Raohe pillow basalts

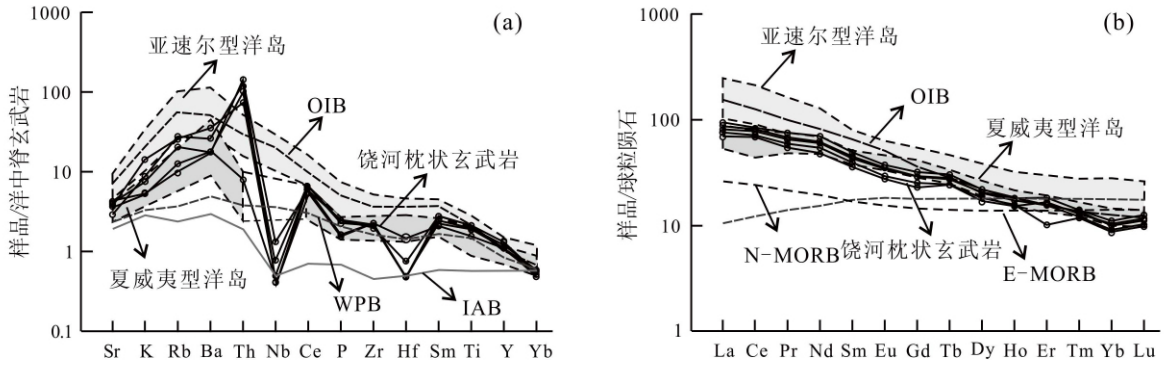
–MORB, 具有 OIB 稀土配分模式特征。∑LREE/∑HREE 比值在 5.8 ~ 6.5 之间, 平均 6.2, $(La/Yb)_N$ = 6.71 ~ 9.57, 平均 8.28, 表明轻重稀土分异强烈; $(La/Sm)_N$ (1.88 ~ 1.93, 平均 1.90) > 1, 具有越不相容, 元素越强烈富集的特征, 与冰岛、亚速尔、夏威夷 OIB 稀土分配模式类似[52]。样品 Eu 无明显异常 ($\delta Eu = 0.92 \sim 0.97$, 平均 0.94), Ce 平均值为 47×10^{-6}, 符合典型洋岛火山岩 ($Ce > 20 \times 10^{-6}$ [53]) 特征; Ba/Ce 平均值为 3.12, 落入 OIB 的比值区 (Ba/Ce 为 1.3 ~ 4.5 [54]); Nd 元素丰度高, > 20, 具有 OIB 特征[27]。

将研究区枕状玄武岩稀土特征进一步与夏威夷型 OIB 和亚速尔型 OIB 进行对比, 样品轻稀土含量和前者一致, 明显低于后者。稀土元素分析表明饶河枕状玄武岩具有夏威夷型 OIB 特征。

3　洋岛源区特征

OIB 型岩浆的形成和演化, 涉及到来自地幔柱、软流圈、岩石圈地幔和地壳等不同端元组分的贡献[57]。样品在稀土元素球粒陨石标准化图解中越不相容元素越富集的特征, 表明富集组分为岩浆

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



N – MORB. 亏损型洋中脊玄武岩; E – MORB. 富集型洋中脊玄武岩; IAB – 岛弧玄武岩; OIB – 洋岛玄武岩; WPB – 板内玄武岩; E – MORB、N – MORB 和 OIB 数据见文献[55]; IAB、WPB 数据见文献[56]; 亚速尔型和夏威夷型洋岛玄武岩地球化学数据见文献[38, 39]

图 4 饶河枕状玄武岩微量元素 N–MORB 标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化蛛网图[44,55]

Fig. 4 N–MORB–normalized spider grams (a) and chondrite–normalized REE patterns (b) for Raohe pillow basalts

起源，很可能经历了熔融程度较低的熔体富集过程[51]。$Mg^{\#}$(58.7 ~ 61.6，平均值 60.3) 低于原生岩浆范围(68 ~ 75)，表明岩浆经历结晶分异作用。样品高 MgO(8.71 ~ 10.82，平均 10.03)、轻稀土元素富集和微量元素 N–MORB 标准化蛛网图上具有“Th”峰值，暗示其源区可能具地幔热柱特征[45]，Wang 等[23]对饶河 OIB 岩浆源区特征研究也得出同样结论。样品具有较高的 La/Sm 比值(2.9 ~ 3.0，平均 2.95) 和 Sm/Yb 比值(3.1 ~ 4.5，平均 3.9)，在 La/Sm – Sm/Yb 图中，投在由石榴石二辉橄榄岩组成的熔融线上(未附图)[58]，该矿物为大洋底部新生岩石圈的组成部分，反映地幔热柱上升过程中有新生岩石圈熔体的加入[51]。样品偏低的 CaO 含量(4.6 ~ 5.3，平均 5.0 < 10) 支持了有石榴辉石岩熔体的加入[59]，石榴辉石岩是地幔熔体在大洋岩石圈交代过程中产生的交代岩脉[60]，表明地幔热柱熔体在穿过岩石圈的过程中有交代岩脉熔体的物质贡献。由尖晶石/石榴石二辉橄榄岩构成的新生岩石圈和由石榴辉石等构成的岩石圈交代岩脉均是地幔交代作用的产物[51]，熔体富集作用产生的交代地幔构成了不相容元素的重要储源，交代地幔的部分熔融也是 OIB 富集不相容元素的因素之一。样品 P 元素丰度偏低、Nb^{*} 值偏低(0.04 ~ 0.23，平均 0.10 < 1) 和 Lu/Yb(0.165 ~ 0.168，平均 0.167) 表明有来自陆壳端元组分的贡献[43,51,61]，其可能是随再循环的古洋壳带入到地幔深部的陆源沉积物。因此，饶河枕状熔岩的岩浆总体上具有地幔热柱起源特征，并有先期交代地幔熔体的混入。岩浆具有陆壳特征表明来自深部的地幔热柱可能受壳幔循环的影响。

4 饶河枕状熔岩构造属性

主量、微量元素分析均显示饶河枕状玄武岩具有板内或洋岛特征。然而，大陆板内岩浆活动也同样会发育具有 OIB 型地球化学特征的岩石，因此，在判断玄武岩构造属性时，还必须充分利用岩石学、构造组合特征、变质变形特征及其他相关的地质证据[62]。根据玄武岩具有明显的枕状构造，枕体呈现水下喷发特有的淬冷边和放射状裂隙，镜下见有典型的中空骸晶结构和鬣刺结构，玄武岩呈构造岩片产出，与橄榄岩、辉石橄榄岩、辉石岩、堆晶辉长岩、辉绿岩、放射虫硅质岩和深海锰结核等构造岩片一起混杂于晚侏罗世碎屑岩中，显示增生杂岩特征[11-14,20]，认为饶河枕状玄武岩是海底火山喷发的产物，形成于大洋板内的洋岛环境而不是大陆板内环境。

现今洋岛按构造背景和火山岩组合分为夏威夷型和亚速尔型两种类型[51]：夏威夷型洋岛形成于洋中脊外侧(轴外) 的大洋板内环境[63]，以拉斑玄武岩为主[58,64-66]，而亚速尔型洋岛与洋中脊位置重叠[45,67]，由碱性玄武岩及其分异物所组成[68]。两者主要地质及地球化学特征判别标志见表 2。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　不同类型 OIB 的判别标志及其与饶河枕状玄武岩对比[45,52,64,65,69,70]

Table 2　Distinguishing marks of different OIB types and comparison with Raohe pillow basalts

洋岛类型	岩性主要特征	地化特征					构造部位	洋盆演化阶段	威尔逊演化阶段
		ΣREE	$(Ce/Yb)_N$	$(La/Yb)_N$	$(Ce/Sm)_N$	$(La/Sm)_N$			
亚速尔型	碱性玄武岩	150 ~ 240	< 10	12 ~ 18	2.2 ~ 3.1	2.2 ~ 3.6	洋脊	早期阶段	大西洋阶段
夏威夷型	拉斑玄武岩	70 ~ 150	10 ~ 14	2.5 ~ 9	1.1 ~ 2	1.3 ~ 1.9	洋盆内	晚期阶段	太平洋阶段
饶河枕状熔岩	拉斑玄武岩	127	7.8	8.3	1.8	1.9			

TiO_2 的含量能够较好地反映玄武岩的大地构造属性，IAB 具有低 TiO_2 特征，平均含量为 0.83%，洋脊拉斑玄武岩 TiO_2 含量中等，平均 1.44%，OIT 的 TiO_2 含量较高，夏威夷拉斑玄武岩 TiO_2 平均为 2.43%[52]，亚速尔型 OIB 的 TiO_2 平均为 2.89%，饶河枕状玄武岩的 TiO_2 平均含量为 2.1%，表明其具有夏威夷拉斑玄武岩特征。此外，与玄武岩构造岩片相伴生的岩片中分布有大量 T_2-J_2 远洋非补偿沉积环境的放射虫硅质岩，其中还含有深海锰结核[10,12,20]，反映了完达山增生杂岩体主要形成于洋中脊外侧的大洋板内环境，而不是形成于洋中脊环境之中，而枕状玄武岩的年龄为 (169.19 ± 6.48) Ma，和洋岛伴生的斜长岩和斜长花岗岩锆石 U–Pb 年龄为 167 ~ 169 Ma[23,25]，与代表轴外环境的 J_2 放射虫硅质岩为同时代产物。揭示出本区的枕状玄武岩构造属性属于夏威夷型 OIB。

5　饶河枕状熔岩构造背景及研究意义

前人研究一般认为，OIB 是典型的大洋板块内部岩浆作用的产物，其形成与地幔柱有关，同时，它的出现代表了古洋盆已经发育成一定规模，并以此为依据来论述造山带曾经经历了成熟的大洋演化阶段[50,71–73]。然而，研究表明，并不是所有的洋岛都形成于成熟的大洋板内，例如，亚速尔型洋岛形成于洋中脊与地幔柱重叠的构造环境中，地幔柱属于洋中脊中轴型[67]。这种类型的地幔柱是岩石圈板块初始破裂和大洋开启的动力[45]，是洋脊初始扩张阶段的产物，它的存在不能反映已经形成较大规模的洋盆，也不能反映成熟洋壳的结构、规模及演化。夏威夷型洋岛形成于成熟的大洋板内，是成熟洋壳结构的主要组成部分，该类型洋岛的出现反映了洋盆已经进入消减阶段[64,65]，夏威夷型洋岛才是成熟古洋盆存在的标志。因此，在进行与洋岛相关的洋盆演化分析过程中，必须首先区分洋岛的类型，才能得出正确的结论。上述研究表明，饶河枕状玄武岩构造属性属于夏威夷型洋岛，它是古太平洋成熟洋盆存在的直接证据之一。在完达山增生杂岩带中，还分布大量代表远洋或深海环境的中三叠世—晚侏罗世早期的放射虫硅质岩，其中夹有标志着远洋环境的锰结核，放射虫具有随时代变新而呈现出从低纬度的温水型向中高纬度的冷水型过渡的特点[2,12,20,28]，深海沉积及古生物特征进一步佐证了中生代古洋盆属于成熟的大洋盆地。赵海玲等[25]在饶河 OIB 中获得 Rb–Sr 同位素年龄为 (169.19 ± 6.48) Ma，Wang 等[23]获得同一洋岛系统中斜长岩和斜长花岗岩锆石 U–Pb 年龄为 167 ~ 169 Ma，反映出这一成熟的洋壳至少形成于 169 Ma 之前。

蛇绿岩与 OIB 都是古洋壳结构的重要组成部分，分别代表了古洋盆演化的不同阶段。完达山增生杂岩带除了 OIB 岩片外，还分布橄榄岩、角闪辉石岩、堆晶辉长岩、辉绿岩、斜长岩和斜长花岗岩等构造岩片，它们具有 MORB 的特征[26,74]，是蛇绿岩残片的典型标志，也是大洋扩张脊岩浆活动的产物[63,75]。在晚侏罗世—早白垩世，古太平洋板块向佳木斯东缘俯冲，海山及洋岛等地貌突出物在俯冲过程中在海沟处被削刮，并与仰冲的蛇绿岩和洋盆沉积岩岩片一起混杂堆积形成增生楔。因此，OIB、蛇绿岩及远洋沉积的存在反映了饶河地区经历了古太平洋板块的扩张、洋中脊轴外板内地幔柱的上涌、洋壳俯冲消减以及向佳木斯地块增生的演化过程。

6　结论

(1) 饶河玄武岩具有典型的枕状构造、淬冷

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

边、中空骸晶和鬣刺结构特征，地球化学特征揭示出饶河枕状玄武岩的构造属性属于夏威夷型洋岛玄武岩，它是成熟洋壳存在的直接证据，形成于洋壳消减阶段的洋中脊轴外板内喷发环境。结合代表远洋或深海环境的中三叠世—晚侏罗世早期的放射虫硅质岩和锰结核等特征，确定了至少在169 Ma之前就已经形成了成熟的大洋盆地。

(2) 饶河玄武岩的岩浆具有地幔热柱起源特征，并有先期交代地幔熔体的混入，岩浆具有陆壳特征，表明来自深部的地幔热柱可能受壳幔循环的影响。

(3) 蛇绿岩和夏威夷型洋岛玄武岩的存在以及它们现今呈构造岩片的产出状态，反映了饶河地区经历了古太平洋板块的扩张、洋中脊轴外板内地幔柱的上涌、洋壳俯冲消减以及向佳木斯地块仰冲增生的演化过程。

参考文献:

[1] Mizutani S, Kojima S, Shao J A, et al. Mesozoic radiolarians from the Nadanhada area, Northeast China [J]. Proceedings of the Japan Academy (Ser. B): Physical and Biological Sciences, 1986, 62 (9): 337-340.

[2] Kojima S, Mizutani S. Triassic and Jurassic radiolaria from the Nadanhada Range, Northeast China [J]. Transactions and Proceedings-Palaecaontological Society of Japan. 1987 (148): 256-275.

[3] 王秀璋. 中国黑龙江饶河地区中生代褶皱带内的海相中生代地层 [J]. 地质科学, 1959, 2: 50-51.
WANG Xiu-zhang. Marine Mesozoic strata in Mesozoic fold belt of Raohe area, Heilongjiang, China [J]. Chinese Journal of Geology, 1959, 2: 50-51.

[4] 李文亢，韩建修，张树新，等. 那丹哈达岭北段上古生界基本地质特征 [J]. 中国地质科学院院报, 1979, 1 (1): 104-120.
LI Wen-kang, HAN Jian-xiu, ZHANG Shu-xin, et al. Basic geological characteristics of Upper Paleozoic in the north part of Nadanhada Range [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geology Sciences, 1979, 1 (1): 104-120.

[5] 黄汲清，任纪舜，姜春发，等. 中国大地构造及其演化 [M]. 科学出版社, 1980: 1-118.
HUANG Ji-qing, REN Ji-shun, JIANG Chun-fa, et al. Geotectonic evolution of China [M]. Beijing: Science Press, 1980: 1-118.

[6] 李春昱，王荃，刘雪亚，等. 亚洲大地构造的演化 [J]. 地球学报, 1984, 6 (3): 3-11.
LI Chun-yu, WANG quan, LIU Xue-ya, et al. Tectonic evolution of Asia [J]. Acta Geoscientica Sinica, 1984, 6 (3): 3-11.

[7] Mizutani, 邵济安，张庆龙. 那丹哈达地体与东亚大陆边缘中生代构造的关系 [J]. 地质学报, 1989, 63 (3): 204-216.
Mizutani S, SHAO Ji-an, ZHANG Qing-long. The Nadanhada terrane in relationship to Mesozoic on continental margins of East Asia [J]. Acta Geologica Sinica, 1989, 63 (3): 204-216.

[8] 杨继权，王秀琴，刘殿生，等. 黑龙江省大地构造单元划分及特征 [J]. 世界地质, 2007, 26 (4): 426-434.
YANG Ji-quan, WANG Xiu-qin, LIU Dian-sheng, et al. Division and characters of geotectonic unit of Heilongjiang Province [J]. Global Geology, 2007, 26 (4): 426-434.

[9] Mizutani S, Kojima S. Mesozoic radiolarian biostratigraphy of Japan and collage tectonics along the eastern continental margin of Asia [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1992, 96 (1): 3-22.

[10] Kojima S. Mesozoic terrane accretion in Northeast China, Sikhote-Alin and Japan regions [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1989, 69: 213-232.

[11] 邵济安，王成源，唐克东，等. 那丹哈达岭地层与地体的关系 [J]. 地层学杂志, 1990, 14 (4): 286-291.
SHAO Ji-an, WANG Cheng-yuan, TANG Ke-dong, et al. The relationship between Nadanhada Range strata with terrane [J]. Journal of Stratigraphy, 1990, 14 (4): 286-291.

[12] 邵济安，唐克东，王成源，等. 那丹哈达地体的构造特征及演化 [J]. 中国科学 (B 辑), 1991, 21 (7): 744-750.
SHAO Ji-an, TANG Ke-dong, WANG Cheng-yuan, et al. Tectonic characteristics and evolution of Nadanhada terrane [J]. Chinese Science (Ser. B), 1991, 21 (7): 744-750.

[13] 邵济安，王成源，唐克东. 乌苏里地区构造新探索 [J]. 地质论评, 1992, 38 (1): 33-39.
SHAO Ji-an, WANG Cheng-yuan, TANG Ke-dong. New exploration of the tectonic in Ussuri (Wusuli) region [J]. Geological Review, 1992, 38 (1): 33-39.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[14] 张庆龙. 黑龙江省那丹哈达地体构造初探 [J]. 地质论评，1989，35 (1)：67-71.
ZHANG Qing-long. The Nadanhada terrane in Heilongjiang Province [J]. Geological Review，1989，35 (1)：67-71.

[15] 张庆龙，Mizutani S. 地层特征对比研究在地体解析中的意义 [J]. 地层学杂志，1996，20 (1)：70-75.
ZHANG Qing-long，Mizutani S. The role of stratigraphic correlation study in the terrane analysis [J]. Journal of Stratigraphy，1996，20 (1)：70-75.

[16] 李朋武，张世红. 黑龙江省那丹哈达与日本美浓地区古地磁结果对比及意义 [J]. 长春地质学院学报，1997，27 (1)：62-66.
LI Peng-wu，ZHANG Shi-hong. The contrast of paleomagnetic results between Nadanhada area，Heilongjiang Province and Mino area，Japan，and its significance [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences，1997，27 (1)：62-66.

[17] 张世红，施央申. 黑龙江省东部地体运动的古地磁证据 [J]. 南京大学学报：自然科学，1992，28 (2)：297-301.
ZHANG Shi-hong，SHI Yang-shen. Paleomagnetism of terranes in eastern Heilongjiang Province [J]. Journal of Nanjing University：Natural Sciences Edition，1992，28 (2)：297-301.

[18] 任收麦，朱日祥，邱海峻，等. 黑龙江省饶河枕状玄武岩古地磁学研究及其构造意义 [J]. 地球物理学报，2015，58 (4)：1269-1283.
REN Shou-mai，ZHU Ri-xiang，QIU Hai-jun，et al. Paleomagnetic study on Middle Jurassic lavas of Heilongjiang Province，NE China and its tectonic implications [J]. Chinese Journal of Geophysics，2015，58 (4)：1269-1283.

[19] Khanchuk A E，Phiilippov A N. 那丹哈达山脉和相邻的锡霍特阿林地区的古洋沉积的地层资料 [J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所集刊，1993 (2)：1-9.
Khanchuk A E，Philippov A N. Stratigraphic record of palaeo-oceanic sediments in the Nadanhada Range and the adjacent regions of Sikhote Alin [J]. Memoirs of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources，Chinese Academy of Geological Sciences，1993 (2)：1-9.

[20] 张庆龙. 放射虫化石及地体对比研究 [J]. 古生物学报，1997，36 (2)：245-252.
ZHANG Qing-long. Radiolaria and correlation study of terranes [J]. Acta Palaeontologica Sinica，1997，36 (2)：245-252.

[21] 程瑞玉，吴福元，葛文春，等. 黑龙江省东部饶河杂岩的就位时代与东北东部中生代构造演化 [J]. 岩石学报，2006，22 (2)：353-376.
CHENG Rui-yu，WU Fu-yuan，GE Wen-chun，et al. Emplacement age of the Raohe complex in eastern Heilongjiang Province and the tectonic evolution of the eastern part of northeastern China [J]. Acta Petrologica Sinica，2006，22 (2)：353-376.

[22] 周丽云，王瑜，王娜. 中国东北完达山地区早白垩世同构造岩浆侵位：对晚中生代左行走滑作用的响应 [J]. 地质通报，2015，34 (2)：400-418.
ZHOU Li-yun，WANG Yu，WANG Na，et al. Syntectonic magmatic emplacement in Wanda Mountain，Northeast China：a response to the Late Mesozoic sinistral slip motion [J]. Geological Bulletin of China，2015，34 (2)：400-418.

[23] Wang Z H，Ge W C，Yang H，et al. Middle Jurassic oceanic island igneous rocks of the Raohe accretionary complex，northeastern China：petrogenesis and tectonic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences，2015，111：120-137.

[24] 康宝祥，张海驷. 那丹哈达岭饶河蛇绿岩及其地质意义 [J]. 黑龙江地质，1990，1 (1)：3-18.
KANG Bao-xiang，ZHANG Hai-yang. Raohe ophiolite and its geological significance in Nadanhadaling [J]. Heilongjiang Geology，1990，1 (1)：3-18.

[25] 赵海玲，邓晋福，陈发景，等. 黑龙江完达山地区中侏罗世火山岩特征及其形成构造背景 [J]. 地球科学，1996，21 (4)：428-432.
ZHAO Hai-ling，DENG Jin-fu，CHEN Fa-jing，et al. Petrology and tectonic setting of middle Jurassic volcanic rocks in Wanda Mountain，Heilongjiang Province [J]. Earth Science，1996，21 (4)：428-432.

[26] 张魁武，邵济安. 黑龙江省东部跃进山群中绿片岩的地球化学特征及地质意义 [J]. 岩石学报，1997，13 (2)：168-172.
ZHANG Kui-wu，SHAO Ji-an. The geochemical characteristics and the geological significance of green-schists in Yuejinshan group，East Heilongjiang Province，China [J]. Acta Petrologica Sinica，1997，13 (2)：168-172.

[27] 田东江，周建波，郑常青，等. 完达山造山带蛇绿混杂岩中变质基性岩的地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿物岩石，2006，26 (3)：64-70.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

TIAN Dong-jiang, ZHOU Jian-bo, ZHENG Chang-qing, et al. Geochemical characteristics and tectonics mechanism of the meta-basic rocks for ophiolite complex in Wandashan orogenic belt [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 26 (3): 64-70.

[28] 张勤运. 那丹哈达地体放射虫动物群的生态特征 [J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所集刊, 1992 (1): 18-22.
ZHANG Qin-yun. Ecological characteristics of radiolarian fauna in the Nadanhada terrane [J]. Memoirs of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1992 (1): 18-22.

[29] 孙革, 沙金庚, 王义刚, 等. 黑龙江饶河东安镇侏罗—白垩系界线及 Buchia 新知 [J]. 古生物学报, 1989, 28 (5): 579-597.
SUN Ge, SHA Jin-geng, WANG Yi-gang, et al. Jurassic-Creataceous boundry of Dong'anzhen, Raohe, Heilongjiang with a new knowledge of Buchia [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1989, 28 (5): 579-597.

[30] 孙革, 郑少林, 孙学坤, 等. 黑龙江东部侏罗—白垩系界线附近地层研究新进展 [J]. 地层学杂志, 1992, 16 (1): 49-54.
SUN Ge, ZHENG Shao-lin, SUN Xue-kun, et al. New research progress of formation near Jurassic-Creataceous boundry in East Heilongjiang [J]. Journal of Stratigraphy, 1992, 16 (1): 49-54.

[31] 沙金庚. 黑龙江东部的 Buchia 和 Aucellina 层 [J]. 地层学杂志, 1992, 16 (1): 41-48.
SHA Jin-geng. The formation of Buchia and Aucellina in the East Heilongjiang [J]. Journal of Stratigraphy, 1992, 16 (1): 41-48.

[32] 沙金庚. 中国侏罗纪年代地层学研究的现状 [J]. 地层学杂志, 2005, 29 (2): 124-129.
SHA Jin-geng. Current situation of the Jurassic chronostratigraphic studies in China [J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29 (2): 124-129.

[33] 沙金庚. 亚洲东部非海相与海相早白垩世地层的对比和古地理意义 [J]. 地层学杂志, 2013, 37 (4): 576-577.
SHA Jin-geng. Contrast of Early Cretaceous non-marine and marine strata, eastern Asia and its paleogeographic significance [J]. Journal of Stratigraphy, 2013, 37 (4): 576-577.

[34] Sha J G. Cretaceous stratigraphy of Northeast China: non-marine and marine correlation [J]. Cretaceous Research, 2007, 28 (2): 146-170.

[35] Sha J G, Matsukawa M, Cai H, et al. The Upper Jurassic-Lower Cretaceous of eastern Heilongjiang, Northeast China: stratigraphy and regional basin history [J]. Cretaceous Research, 2003, 24 (6): 715-728.

[36] 刘俊杰, 刘荣芝, 伦志强. 黑龙江省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-734.
LIU Jun-jie, LIU Rong-zhi, LUN Zhi-qiang. Regional geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-734.

[37] 王庆双, 杨言辰, 张颖, 等. 黑龙江先锋北山金矿区花岗闪长斑岩和石英闪长玢岩年代学及地质意义 [J]. 世界地质, 2015, 34 (1): 67-77.
WANG Qing-shuang, YANG Yan-chen, ZHANG Ying, et al. Chronology of granodiorite-porphyry and diorite porphyry in Xianfengbeishan gold deposit of Heilongjiang, and their tectonic implications [J]. Global Geology, 2015, 34 (1): 67-77.

[38] Bärbel Sarbas, Uwe Nohl, Ute Busch, et al. Query by geological setting: ocean island-Azores [DB/OL]. [2015-09-01]. Http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/Start.asp.

[39] Bärbel Sarbas, Uwe Nohl, Ute Busch, et al. Query by geological setting: ocean island—Hawaiian [DB/OL]. [2015-09-01]. Http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/Start.asp.

[40] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图 [J]. 岩石学报, 1993, 9 (2): 146-157.
LI Shu-guang. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite [J]. Atca Petrologica Sinica, 1993, 9 (2): 146-157.

[41] 张旗, 肖序常. 中国蛇绿岩研究概述 [J]. 岩石学报, 1995, 11 (增刊): 1-9.
ZHANG Qi, XIAO Xu-chang. A comment on study ophiolites [J]. Atca Petrologica Sinica, 1995, 11 (Suppl.): 1-9.

[42] 徐夕生, 邱检生. 火成岩岩石学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-346.
XU Xi-sheng, QIU Jian-sheng. Igneous petrology [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-346.

[43] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1-195.
LI Chang-nian. Igneous trace elements petrology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1922: 1-195.

[44] Pearce J A. Geochemical evidence for the genesis and

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

eruptive setting of lavas from Tethyan ophiolites [C] // Proceedings of the International Ophiolite Symposium, Cyprus 1979. Ministry of Agriculture and Natural Resources, Cyprus, 1980: 261-272.

[45] 侯增谦，莫宣学，朱勤文，等. “三江”古特提斯地幔热柱-洋岛玄武岩证据 [J]. 地球学报，1996，17 (4)：343-361.
HOU Zeng-qian, MO Xuan-xue, ZHU Qin-wen, et al. Mantle plume in the Sanjiang Paleo-Tethyan lithosphere: evidence from mid-ocean ridge basalts [J]. Acta Geoscientica Sinica, 1996, 17 (4): 343-361.

[46] 邓万明，孙宏娟，张玉泉. 囊谦盆地新生代钾质火山岩成因岩石学研究 [J]. 地质科学，2001，36 (3)：304-318.
DENG Wan-ming, SUN Hong-juan, ZHANG Yu-quan. Petrogenesis of Cenozoic potassic volcanic rocks in Nangqen Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36 (3): 304-318.

[47] Shervais J W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 59 (1): 101-118.

[48] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: identification and significance [J]. Lithos, 1989, 23 (1): 1-18.

[49] Perfit M R, Gust D A, Bence A E, et al. Chemical characteristics of island-arc basalts: implications for mantle sources [J]. Chemical Geology, 1980, 30 (3): 227-256.

[50] 李永飞，赖绍聪. 碧口洋岛型火山岩的厘定及其构造意义 [J]. 西北地质，2006，39 (4)：1-9.
LI Yong-fei, LAI Shao-cong. Discrimination of OIB volcanic rocks of Bikou group and their tectonic implication [J]. Northwest Geology, 2006, 39 (4): 1-9.

[51] 牛耀龄. 板内洋岛玄武岩 (OIB) 成因的一些基本概念和存在的问题 [J]. 科学通报，2010，55 (2)：103-114.
NIU Yao-ling. Some basic concepts and problems on the petrogenesis of intra-plate ocean island basalts [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (2): 103-114.

[52] 何馥香. 滇西南古特提斯造山带中的古洋岛地体研究：博士学位论文 [D]. 北京：中国地质大学，1993.
HE Fu-xiang. Study on ancient oceanic islands the PalaeoTethys, Southwest Yunnan: doctor's degree thesis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 1993.

[53] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. Earth and Planet Science Letters, 1988, 90 (3): 297-314.

[54] Halliday A N, Lee D C, Tommasini S, et al. Incompatible trace elements in OIB and MORB source enrichment in the sub-oceanic mantle [J]. Earth and Planet Science Letters, 1995, 133 (3): 379-395.

[55] 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 (1): 313-345.

[56] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [J]. Andesites, 1982, 8: 525-548.

[57] 徐义刚. 地幔柱构造，大火成岩省及其地质效应 [J]. 地学前缘，2002，9 (4)：341-353.
XU Yi-gang. Mantle plumes, large igneous provinces and their geological consequences [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9 (4): 341-353.

[58] 廖宝丽，张招崇，寇彩化，等. 贵州水城二叠纪钠质粗面玄武岩的地球化学特征及其源区 [J]. 岩石学报，2012，28 (4)：1238-1250.
LIAO Bao-li, ZHANG Zhao-chong, KOU Cai-hua, et al. Geochemical of the Shuicheng Permian sodium trachybasalts in Guizhou Province and constraints on the mantle sources [J] Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (4): 1238-1250.

[59] 陈立辉，曾罡，胡森林，等. 地壳再循环与大陆碱性玄武岩的成因：以山东新生代碱性玄武岩为例 [J]. 高校地质学报，2012，18 (1)：16-27.
CHEN Li-hui, ZENG Gang, HU Sen-lin, et al. Crustal recyling and genesis of continental alkaline basalts: case study of the Cenozoic alkaline basalts from Shandong Province, eastern China [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18 (1): 16-27.

[60] Pilet S, Hernandez J, Sylvester P, et al. The metasomatic alternative for ocean island basalt chemical heterogeneity [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 236 (1): 148-166.

[61] Rudnick R L, Gao S X. Composition of the continental crust [J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 3: 1-64.

[62] 赖绍聪，张国伟，裴先治，等. 南秦岭康县—琵琶寺—南坪构造混杂带蛇绿岩与洋岛火山岩地球化学及其大地构造意义 [J]. 中国科学 (D 辑)，2003，33 (1)：10-19.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

LAI Shao-cong, ZHANG Guo-wei, PEI Xian-zhi, et al. Geochemistry of the ophiolite and oceanic island basalts in the Kangxian-Pipasi-Nanping tectonic melange zone, South Qingling and their significance [J]. Science in China (Ser. D), 2003, 33 (1): 10-19.

[63] 张旗. 蛇绿岩研究中的几个问题 [J]. 岩石学报, 1995, 11 (增刊): 228-240.
ZHANG Qi. Some problems concerning the ophiolite study [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11 (Suppl.): 228-240.

[64] 吴根耀, 王晓鹏, 聂泽同, 等. 藏东南碧土带瓦浦组火山岩形成的大地构造环境 [J]. 现代地质, 2000, 14 (1): 21-28.
WU Gen-yao, WANG XIAO-peng, NIE Ze-tong, et al. The tectonic setting of the volcanic rocks in the Wapu Formation from Bitu area, Southeast Xizang [J]. Geoscience, 2000, 14 (1): 21-28.

[65] 吴根耀, 吴浩若, 钟大赉, 等. 滇桂交界处古特提斯的洋岛和岛弧火山岩 [J]. 现代地质, 2000, 14 (4): 393-400.
WU Gen-yao, WU Hao-ruo, ZHONG Da-lai, et al. Volcanic rocks of paleotethyan oceanic island and island-arc bordering Yunnan and Guangxi, China [J]. Geoscience, 2000, 14 (4): 393-400.

[66] 杨高学, 李永军, 佟丽莉, 等. 西准噶尔蛇绿混杂岩中洋岛玄武岩研究新进展 [J]. 地质学报, 2015, 89 (2): 392-405.
YANG Gao-xue, LI Yong-jun, TONG Li-li, et al. New advance in oceanic island basalts of ophiolitic Mélange from the West Junggar [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89 (2): 392-405.

[67] Schilling J G, Thompson G, Kingsley R, et al. Hotspot-migrating ridge interaction in the South Atlantic [J]. Nature, 1985, 313: 187-191.

[68] 吴根耀. 藏东碧土地区古特提斯主洋盆中的亚速尔型洋岛玄武岩 [J]. 地质通报, 2006, 25 (7): 772-781.
WU Gen-yao. Azores-type oceanic island basalts in the Paleo-Tethyan major oceanic basin in the Bitu area, eastern Tibet, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (7): 772-781.

[69] Saunders A D. The rare earth element characteristics of igneous rocks from the ocean basins [J]. Rare Earth Element Geochemistry, 1984: 205-236.

[70] 吴根耀, 李曰俊. 桂东南马山沿灵山断裂出露的印支期洋岛玄武岩及其区域构造意义 [J]. 现代地质, 2011, 25 (4): 682-691.
WU Gen-yao, LI Yue-jun. The Mashan indosinian oceanic basalt outcropping along Lingshan fracture in Southeast Guangxi and its tectonic implications [J]. Geoscenice, 2011, 25 (4): 682-691.

[71] 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 等. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据 [J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21 (1): 24-30.
WU Jun, LAN Chao-li, LI Ji-liang, et al. Geochemical evidence of MORB and OIB combination in Hongliugou ophiolite mélanges, Altun fault belt [J]. Acta Petrological et Mineralogica, 2002, 21 (1): 24-30.

[72] 朱永峰, 徐新, 魏少妮, 等. 西准噶尔克拉玛依 OIB 型枕状玄武岩地球化学及其地质意义研究 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (7): 1739-1748.
ZHU Yong-feng, XU xin, WEI Shao-ni, et al. Geochemistry and tectonic significance of OIB-type pillow basalts in western Mts. of Karamay city (western Junggar), NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (7): 1739-1748.

[73] 王涛, 王宗起, 闫臻, 等. 南秦岭大堡组奥陶纪洋岛玄武岩的识别及其构造意义: 来自地球化学和年代学证据 [J]. 岩石学报, 2009, 25 (12): 3241-3250.
WANG Tao, WANG Zong-qi, YAN Zhen, et al. Identification of the Ordovician oceanic island basalts and their tectonic significance of the Dabao Formation in southern Qinling: constraints from geochemistry and geochronology of oceanic island basalts [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (12): 3241-3250.

[74] Zhou J B, Cao J L, Wilde S A, et al. Paleo-Pacific subduction-accretion: evidence from geochemical and U-Pb zircon dating of the Nadanhada accretionary complex, NE China [J]. Tectonics, 2014, 33 (12): 2444-2466.

[75] 科尔曼 R G. 蛇绿岩 [M]. 鲍佩声, 译. 北京: 地质出版社, 1982: 1-140.
Coleman R G. Ophiolite [M]. BAO Pei-sheng, translated. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 1-140.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net