

吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因*

冯光英^{1,2} 刘燊^{1**} 冯彩霞¹ 贾大成³ 钟宏¹ 于晓飞⁴ 齐有强¹ 王涛⁵

FENG GuangYing^{1,2}, LIU Shen^{1**}, FENG CaiXia¹, JIA DaCheng³, ZHONG Hong¹, YU XiaoFei⁴, QI YouQiang¹ and WANG Tao⁵

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130061

4. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

5. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130061, China

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

5. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2009-11-23 收稿, 2011-05-30 改回.

Feng GY, Liu S, Feng CX, Jia DC, Zhong H, Yu XF, Qi YQ and Wang T. 2011. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and the petrogenesis of the ultramafic pluton in Hongqiling, Jiling Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1594-1606

Abstract Zircon LA-ICP-MS U-Pb analysis yields an age of 220.6 ± 2.0 Ma for the ultramafic rocks from Hongqiling, Jilin Province, NE China, indicating that these rocks were formed during Late Indochina stage. The rocks are characterized by low SiO_2 (43.22% ~ 44.48%), K_2O (0.10% ~ 0.17%) and Na_2O (0.15% ~ 2.13%) contents, high MgO (29.23% ~ 30.38%) and $\text{Mg}^\#$ values (83 ~ 84), enrichment in LREE ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.95 \sim 2.61$), large ion lithophile elements (LILEs, Rb and Sr) and Pb, depletion in the high field strength elements (HFSEs), such as Nb, Ta, Zr and Ti, without significant Eu anomalies. In addition, the ultramafic rocks have low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.70394 ~ 0.70408), positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (7.2 ~ 8.1) and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (9.6 ~ 14.4). Based on the above discussions, we proposed that the studied ultramafic rocks were derived from a depleted lithospheric mantle (garnet-herzolite) source which was metasomatized by the fluid from the dehydration of the subducted oceanic (Paleo-Asian Ocean) sediments. When the primary magma ascent, obvious fractionation of olivine and clinopyroxene took place, significant crustal contamination, however, did not occur. Otherwise, tectonic and geodynamic investigation indicate that the studied ultramafic rocks were formed in a post-orogenic extensional setting after the collision between the Jiamusi block and North China Craton (NNC).

Key words U-Pb age; Sr-Nd-Hf isotopic; Ultramafic rocks; Petrogenesis; Hongqiling; Jilin Province

摘要 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 (220.6 ± 2.0 Ma) 表明研究区超基性岩属于印支晚期岩浆活动的产物。主微量元素研究显示超基性岩具有相对较低的 SiO_2 (43.22% ~ 44.48%)、 K_2O (0.10% ~ 0.17%) 和 Na_2O (0.15% ~ 2.13%) 以及较高的 MgO 含量 (29.23% ~ 30.38%) 和 $\text{Mg}^\#$ 值 (83 ~ 84)、轻稀土 (LREE) 相对富集 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.95 \sim 2.61$)、缺少明显的 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.90 \sim 1.08$)、富集大离子亲石元素 (Rb 和 Sr) 和 Pb、以及亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr 和 Ti; Sr、Nd、Hf 同位素研究表明,

* 本文受中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-QN10)、国家自然科学基金项目 (40972071、40773020) 和西北大学大陆动力学国家重点实验室开放课题基金 (08LCD08) 联合资助。

第一作者简介: 冯光英, 女, 1983 年生, 博士研究生, 地球化学专业, E-mail: fengguangying198@163.com

** 通讯作者: 刘燊, 男, 1974 年生, 博士, 研究员, 从事岩石学和地球化学研究, E-mail: liushen@vip.gyig.ac.cn

超基性岩具有低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.70394 ~ 0.70408)、正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (3.5 ~ 4.0) 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (9.6 ~ 14.4)。综合研究表明: 红旗岭超基性岩来自亏损的岩石圈地幔源区, 且源区部分熔融前受到了来自俯冲大洋(古亚洲洋)沉积物析出流体的交代作用影响。原始岩浆在上升侵位过程中经历了明显的矿物(橄榄石、斜方辉石等)分离结晶作用, 但在上升过程没有受到地壳物质的明显混染。构造和动力学背景分析研究表明, 研究区超基性岩为佳木斯地块和华北克拉通碰撞造山后伸展拉张阶段的产物。

关键词 U-Pb 年龄; Sr-Nd-Hf 同位素; 超基性岩; 岩石成因; 红旗岭; 吉林省

中图法分类号 P588.125; P597.3

东北地区中生代花岗岩极为发育, 特别是中生代印支-燕山期岩体分布面积巨大(~ 300000km²), 可称为巨型花岗岩省(吴福元和曹林, 1999; 吴福元等, 2007a; Wu *et al.*, 2011), 该区花岗岩的系统研究对重新准确厘定和划分花岗岩形成的时代和类型, 以及探讨中生代东北地区地壳增生及壳幔相互作用等深部动力学问题具有重要意义, 因此得到了广泛的关注(Liu *et al.*, 2010a; Guo *et al.*, 2010)。与此相比, 作为幔源岩浆活动的产物, 基性-超基性岩在东北地区虽有一定程度的出露, 但系统的地球化学研究仍相对较弱(Wu *et al.*, 2004; 唐文龙和杨言辰, 2007)。目前, 在红旗岭地区胡兰群地层中已发现 30 多个基性-超基性杂岩体, 且很多岩体与 Cu、Ni 和 PGE 矿床有成因上的联系, 从而使红旗岭成为中国第二大 Cu-Ni 硫化物矿床产地(Wu *et al.*, 2004)。因此, 通过对红旗岭地区基性-超基性杂岩体的系统研究, 不仅对了解该地区地幔源区的性质、演化过程以及地幔演化与地壳形成之间的关系具有重要意义(Melcher *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2010b); 而且对认识研究区杂岩体的成因及与兴蒙造山带的形成和 Cu-Ni 矿化之间的关系具有重要的意义(Wu *et al.*, 2004)。虽然如此, 前期的研究主要集中在红旗岭 Cu-Ni 矿床的矿床地质特征、成矿时代以及成矿机制等方面(郝爱华等, 2004, 2005; 杨言辰等, 2005; 董耀松等, 2004), 而与成矿有关的基性-超基性岩体的相关研究(特别是精细年代学)则较少(Wu *et al.*, 2004; 张广良和吴福元, 2005; 唐文龙和杨言辰, 2007)。这在一定程度上制约了对该地区基性-超基性岩体形成的年龄(早古生代: 吉林省地质矿产局, 1988)、成因及动力学背景和意义的全面正确把握。鉴于上述原因, 在前人研究的基础上, 本研究选择红旗岭地区一个研究程度很低的超基性岩体(图 1), 通过系统的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、元素地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究, 对该岩体的形成时代、成因和形成的动力学背景及意义加以探讨, 本研究有望为东北地区的构造演化提供一定的依据。

1 地质背景和岩石学特征

古生代时期东北地区被牡丹江断裂和嫩江断裂分为 3 个微陆块, 分别为东南部的佳木斯地块、中间的松辽板块以及西北部的兴安陆块(叶茂等, 1994; 吴福元等, 1995)。佳木斯地块主要出露 2 个不同的岩石系列: 马山杂岩体和黑龙江杂岩体。马山杂岩体经历了麻粒岩相变质作用, 主要包括麻粒岩、白云岩、石墨化片岩及片麻岩和含石榴子石麻粒岩。

而黑龙江杂岩体主要沿牡丹江断裂出露, 在佳木斯板块和松辽板块之间, 主要为高度变形的蓝片岩相岩石: 蓝闪石片岩、白云岩和燧石(Wu *et al.*, 2003a, b), 代表了佳木斯地块和西部块体的缝合线; 松辽板块包括北部的小兴安岭构造带、中部的松辽盆地以及东部的张广才岭构造带; 兴安块体位于大兴安岭构造带, 广泛分布中生代火山岩和花岗岩, 元古代变质岩以及古生代地层(黑龙江省地质矿产局, 1993; Wu *et al.*, 2003a, b)(图 1a)。

研究表明佳木斯地块和松辽块体可能在志留纪拼合在一起(黑龙江省地质矿产局, 1993), 晚志留纪-早石炭纪时期 2 块体作为一个整体沿嫩江断裂同兴安块体拼合形成了最后的兴蒙造山带(叶茂等, 1994; Wu *et al.*, 2000)。兴蒙造山带展布范围大体相当于内蒙-大兴安岭褶皱系的范围, 它是在华北板块与西伯利亚板块对接基础上形成的。目前, 古地磁方面的研究表明华北克拉通和兴蒙板块在晚二叠纪之前已经拼合在一起, 并在晚侏罗纪, 随着蒙古-鄂霍次克海的闭合而同西伯利亚板块碰撞拼合(Zhao *et al.*, 1990)。兴蒙造山带主要可能经历了两个构造演化阶段: 古生代古亚洲洋的闭合以及中-新生代(古)太平洋的俯冲(Wu *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 1995; Guo *et al.*, 2007)。

吉林红旗岭镁铁-超镁铁岩位于吉林中部, 主要位于兴蒙古造山带的东部, 南部毗邻华北地台, 北部与佳木斯地块相接, 处于古亚洲洋和环太平洋两大构造域的交汇部位。研究区超基性岩体构造位置上归属松辽块体东段的张广才岭地块, 该地块出露的地层及岩石类型主要为泥盆-志留系呼兰群中-浅变质岩(云母片岩类、片麻岩类、角闪岩和大理岩类), 原岩主要为泥质沉积岩、凝灰岩、碱性玄武岩和灰岩(施性明和兰玉琦, 1985; 孟繁兴, 1992), 变质岩周围被大量的显生宙花岗岩(海西期花岗岩以及燕山期花岗岩和白岗质花岗岩)分割和包围(孙德有等, 2001)(图 1b)。

红旗岭超基性岩的主要岩性为橄榄辉石岩, 块状构造, 矿物组成主要为橄榄石(30% ~ 35%)、辉石(斜方辉石和单斜辉石)(60% ~ 70%)和少量(~5%)的角闪石、黑云母及暗色铁质矿物(磁铁矿、钛铁矿和铬铁矿)。橄榄石自形程度高, 多呈球粒状, 很多包裹在辉石中, 形成包橄结构, 反映了岩浆分离结晶的特点; 同时镜下观察可以看到网状结构, 暗示橄榄石可能存在一定的蛇纹石化蚀变。

2 测试方法

样品的破碎和锆石的挑选工作在河北廊坊区调院完成。

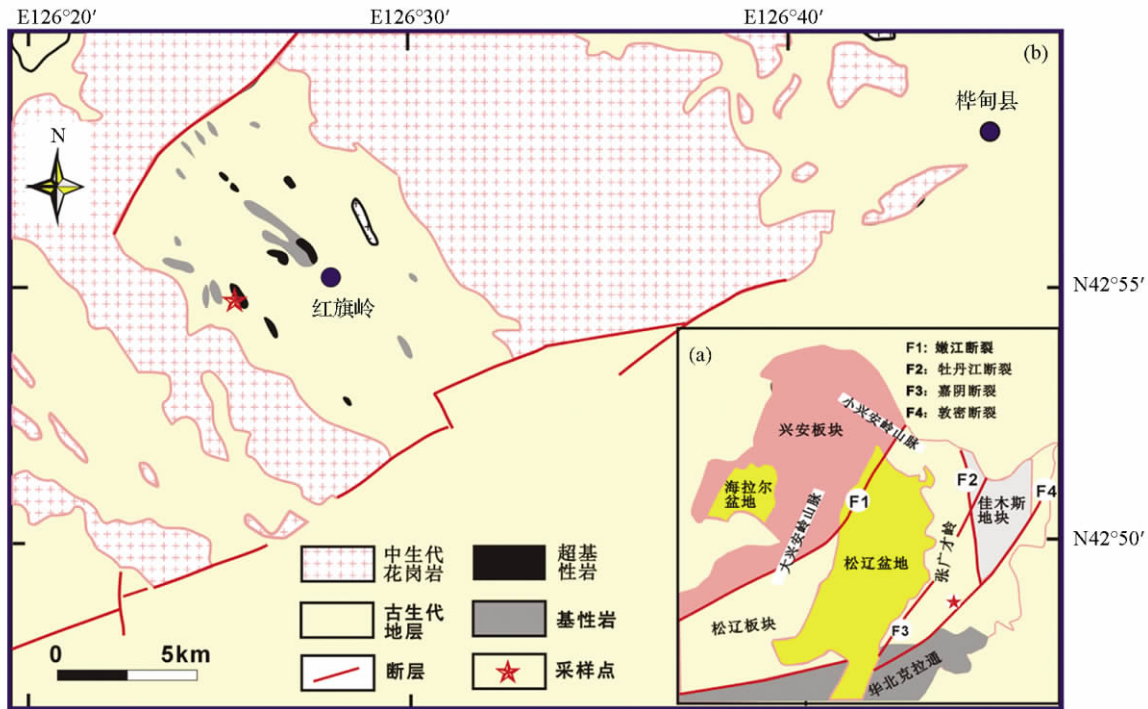


图1 东北地区主要块体分布图(a, 据刘燊等 2009 和 Wu *et al.*, 2000) 和研究区地质简图(b)

Fig. 1 Distribution of major terranes in northeastern China (a, after Liu *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2000) and the simplified geological map of the studied area (b)

锆石阴极发光图像处理在西北大学“大陆动力学国家重点实验室”完成。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.* (2008, 2010)。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据(Wiedenbeck *et al.*, 1995)。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003) 完成。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所进行,所用仪器为配有 193nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS), 激光束斑直径为 63 μ m, 激光剥蚀时间为 26s, 所用的激光脉冲速率为 8~10Hz, 激光脉冲能量为 100mJ, 测定时用锆石国际标样 91500 作外标。实验中采用 He 气作为剥蚀物质载气。详细测试流程以及仪器运行条件等参见 Wu *et al.* (2006)。

主微量元素测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。主元素测试采用 Axios PW4400 型 X 荧光光谱仪, 分析精度优于 3%; 微量元素分析采用 ELAN 6000 ICP-MS 完成, 分析精度优于 5%。

Sr-Nd 同位素测定在中国地质大学(武汉)地质过程与

矿产资源国家重点实验室的同位素实验室完成, 所用仪器为 MAT-261 热电离蒸发固体质谱计(TIMS), 具体的实验流程参见张永清等(2008)。Sm、Nd 和 Rb、Sr 的过程空白值分别 <200pg 和 <500pg, 所有样品的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 统一采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 以及 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行标准化处理(Depaolo, 1988)。分析过程中 NBS987 Sr 标准和 La Jolla Nd 标准分别为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710248 \pm 12$ (2σ , $n = 10$) 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511856 \pm 10$ (2σ , $n = 10$)。

3 分析结果

3.1 U-Pb 锆石年龄

从样品(>50kg, HQL01)中挑选出 >200 粒的锆石。挑选出的锆石为自形无色透明状, 大多锆石直径接近或大于 100 μ m, 阴极发光下具有清晰的震荡环带。所测试锆石的 Th/U 比值均大于 0.1 (0.2~1.65 之间)(表 1), 具有岩浆锆石的特征。13 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $220.6 \pm 2.0\text{Ma}$ (图 2), 代表了该岩体的结晶年龄, 表明其为印支晚期岩浆活动的产物, 该年龄与前人对红旗岭 1 号岩体中浅色辉长岩的 SHRIMP 定年结果($216 \pm 5\text{Ma}$) 在误差范围内基本一致(Wu *et al.*, 2004)。

3.2 主、微量元素组成

测定了 20 个代表性样品的主、微量元素(表 2、表 3)。红

表1 红旗岭超基性岩(样品 HQL01) 锆石 U-Pb 年龄

Table 1 Zircon U-Pb age of Hongqiling ultramafic rock (Sample HQL01)

Spot	content(× 10 ⁻⁶)			Th/U	Isotopic ratios						Age(Ma)					
	Th	U	Pb		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
1	3.59	18	12	0.20	0.0485	0.0015	0.2360	0.0073	0.0352	0.0003	121	56	215	6	223	2
2	566	515	28	1.10	0.0501	0.0011	0.2384	0.0056	0.0341	0.0003	200	38	217	5	216	2
3	614	660	33	0.93	0.0512	0.0018	0.2507	0.0082	0.0354	0.0004	252	56	227	7	224	2
4	263	435	21	0.60	0.0514	0.0011	0.2468	0.0053	0.0346	0.0003	258	33	224	4	219	2
5	618	729	37	0.85	0.0523	0.0021	0.2527	0.0102	0.0350	0.0004	299	71	229	8	222	2
6	113	150	7.33	0.75	0.0491	0.0016	0.2353	0.0072	0.0348	0.0004	151	53	215	6	221	2
7	548	517	27	1.06	0.0501	0.0010	0.2399	0.0050	0.0346	0.0003	197	33	218	4	219	2
8	1448	1078	60	1.34	0.0519	0.0011	0.2540	0.0055	0.0354	0.0003	280	34	230	4	224	2
9	1025	946	51	1.08	0.0506	0.0012	0.2396	0.0057	0.0344	0.0003	220	38	218	5	218	2
10	670	537	29	1.25	0.0508	0.0013	0.2460	0.0065	0.0352	0.0005	230	38	223	5	223	3
11	545	481	25	1.13	0.0507	0.0016	0.2351	0.0071	0.0339	0.0003	225	52	214	6	215	2
12	754	630	34	1.20	0.0508	0.0015	0.2426	0.0071	0.0345	0.0003	230	51	221	6	219	2
13	1785	1084	66	1.65	0.0512	0.0009	0.2533	0.0046	0.0357	0.0003	252	29	229	4	226	2

表2 红旗岭超基性岩体主量元素组成(wt%)

Table 2 Major elements composition of Hongqiling ultramafic rocks (wt%)

样品号	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	Total	Mg [#]
HQLF-01	30.03	43.37	4.16	11.72	30.03	4.41	0.21	0.12	0.14	0.03	0.25	5.81	100.25	84
HQLF-02	30.38	43.94	3.85	11.70	30.38	3.95	0.15	0.10	0.15	0.03	0.26	5.14	99.65	84
HQLF-03	30.34	44.48	3.63	11.50	30.34	3.87	0.54	0.12	0.14	0.03	0.22	4.97	99.84	84
HQLF-04	29.71	43.46	3.81	11.57	29.71	4.75	0.17	0.13	0.14	0.04	0.26	5.61	99.65	84
HQLF-05	29.66	43.90	3.87	11.32	29.66	4.87	0.17	0.13	0.14	0.03	0.23	5.67	100.01	84
HQLF-06	30.09	43.80	3.76	11.50	30.09	4.82	0.18	0.12	0.14	0.04	0.24	5.55	100.23	84
HQLF-07	29.71	43.38	3.95	11.41	29.71	4.69	0.87	0.17	0.14	0.04	0.23	5.96	100.56	84
HQLF-08	29.96	43.79	3.89	11.48	29.96	4.44	0.17	0.13	0.14	0.03	0.25	5.56	99.85	84
HQLF-09	29.95	43.47	3.83	11.50	29.95	4.85	0.17	0.12	0.14	0.03	0.20	5.76	100.02	84
HQLF-10	29.56	43.61	3.69	12.01	29.56	4.90	0.16	0.13	0.16	0.04	0.24	5.79	100.28	83
HQLF-11	30.28	43.55	3.67	11.52	30.28	4.68	0.16	0.11	0.14	0.03	0.23	5.87	100.24	84
HQLF-12	29.92	43.96	3.86	11.44	29.92	4.41	0.46	0.15	0.14	0.04	0.24	5.51	100.12	84
HQLF-13	29.32	44.45	4.07	11.17	29.32	4.57	0.32	0.14	0.14	0.04	0.24	5.36	99.82	84
HQLF-14	29.23	44.20	3.79	11.24	29.23	5.19	0.27	0.14	0.15	0.03	0.25	5.41	99.90	84
HQLF-15	29.84	43.58	3.81	11.42	29.84	4.50	0.61	0.16	0.14	0.03	0.22	5.77	100.08	84
HQLF-16	29.75	43.71	3.98	11.44	29.75	4.60	0.19	0.13	0.14	0.03	0.23	5.84	100.06	84
HQLF-17	30.20	43.97	3.69	11.37	30.20	4.60	0.56	0.14	0.14	0.03	0.22	5.4	100.32	84
HQLF-18	30.18	43.81	3.76	11.49	30.18	4.53	0.40	0.14	0.14	0.03	0.25	5.47	100.21	84
HQLF-19	30.12	43.51	3.71	11.48	30.12	4.75	0.30	0.11	0.14	0.03	0.23	5.79	100.16	84
HQLF-20	29.44	43.22	3.72	11.12	29.44	4.49	2.13	0.17	0.14	0.04	0.24	5.48	100.19	84

注: Mg[#] = 100 × Mg / (Mg + Σ Fe) 原子个数比

表3 红旗岭超基性岩体微量元素组成(× 10⁻⁶)

Table 3 Trace elements composition of Hongqiling ultramafic rocks (× 10⁻⁶)

样品号	HQLF-01	HQLF-02	HQLF-03	HQLF-04	HQLF-05	HQLF-06	HQLF-07	HQLF-08	HQLF-09	HQLF-10	HQLF-11	HQLF-12	HQLF-13	HQLF-14	HQLF-15	HQLF-16	HQLF-17	HQLF-18	HQLF-19
Sc	14.6	15.5	17.8	16.9	17.7	16.9	16.0	15.1	16.7	17.4	15.6	16.0	15.4	18.9	16.1	16.1	16.3	16.5	15.5
V	75.9	78.3	81.0	81.6	78.9	81.8	75.9	74.7	74.8	80.9	78.2	75.0	74.8	88.1	74.5	78.3	77.3	78.3	73.5
Cr	2760	2840	2770	2760	2730	2890	2680	2530	2520	2760	2700	2740	2500	2830	2520	2630	2770	2570	2680
Co	124	121	120	120	117	124	122	115	118	117	122	114	106	117	117	118	117	117	119
Ni	1190	1140	1140	1190	1150	1190	1180	1120	1170	1130	1180	1190	1040	1170	1140	1160	1130	1160	1240

续表 3

Continued Table 3

样品号	HQLF-01	HQLF-02	HQLF-03	HQLF-04	HQLF-05	HQLF-06	HQLF-07	HQLF-08	HQLF-09	HQLF-10	HQLF-11	HQLF-12	HQLF-13	HQLF-14	HQLF-15	HQLF-16	HQLF-17	HQLF-18	HQLF-19
Cu	88.8	75.5	76.2	93.4	96.0	86.8	92.1	84.8	91.4	101.3	86.1	83.5	88.1	94.7	83.5	92.7	85.4	88.8	105
Zn	60.6	61.2	60.3	59.5	59.5	58.7	60.7	67.7	59.7	93.0	56.2	54.5	53.0	58.5	58.0	62.5	62.9	72.2	72.6
Ga	4.56	4.33	4.28	4.19	4.05	4.23	4.17	4.04	3.66	4.19	4.05	4.12	4.05	4.08	3.89	4.25	4.03	4.14	3.96
Ge	0.89	0.92	1.04	0.92	0.93	0.95	0.95	0.89	0.97	0.90	0.99	0.92	0.90	1.11	0.90	0.88	1.02	1.01	0.90
Rb	3.15	2.72	3.24	3.77	4.78	4.13	4.71	4.28	4.96	5.04	3.36	4.78	4.24	5.16	5.39	4.26	3.93	4.29	3.07
Sr	74.0	61.0	56.1	62.8	66.5	66.9	77.0	70.5	68.9	64.9	70.4	67.8	65.3	66.3	71.0	68.6	61.8	65.0	65.8
Y	5.85	5.69	5.24	6.65	5.67	6.22	5.79	5.62	5.20	6.01	5.76	5.37	5.18	6.02	5.41	5.60	5.29	5.82	5.64
Zr	16.8	14.9	15.6	20.2	18.6	18.7	20.1	19.1	19.9	20.0	16.4	20.9	17.2	22.7	18.7	17.8	17.4	20.2	16.5
Nb	0.39	0.41	0.42	0.53	0.47	0.46	0.51	0.48	0.49	0.52	0.40	0.50	0.45	0.54	0.51	0.46	0.44	0.48	0.41
Cs	0.24	0.22	0.22	0.36	0.57	0.57	0.68	0.36	0.65	0.69	0.64	0.30	0.68	0.73	0.76	0.64	0.38	0.47	0.40
Ba	29.5	22.6	23.7	29.0	29.2	28.8	33.4	33.6	27.8	49.0	28.5	30.5	27.8	29.9	31.2	32.1	25.9	29.7	25.3
La	1.95	1.61	1.47	2.06	1.87	2.20	2.04	1.96	1.82	2.09	1.86	2.00	1.78	1.94	1.99	1.97	1.80	1.78	1.78
Ce	4.33	3.80	3.43	4.81	4.26	4.86	4.63	4.35	4.02	4.68	4.24	4.29	4.09	4.29	4.50	4.45	4.08	4.09	4.14
Pr	0.65	0.60	0.52	0.73	0.62	0.70	0.70	0.66	0.60	0.69	0.64	0.63	0.60	0.65	0.62	0.66	0.60	0.61	0.61
Nd	3.08	2.88	2.57	3.44	2.97	3.37	3.26	3.01	2.87	3.25	3.13	2.94	2.75	3.12	2.95	3.16	2.81	3.04	2.83
Sm	0.82	0.86	0.80	0.99	0.86	0.91	0.91	0.82	0.74	0.96	0.92	0.81	0.77	0.90	0.89	0.82	0.80	0.87	0.85
Eu	0.30	0.28	0.23	0.34	0.28	0.31	0.30	0.28	0.28	0.32	0.30	0.27	0.28	0.31	0.29	0.28	0.27	0.27	0.30
Gd	0.94	0.97	0.78	1.10	0.87	1.01	0.96	0.94	0.85	0.92	0.91	0.87	0.80	0.98	0.91	0.94	0.88	0.82	0.86
Tb	0.18	0.16	0.14	0.19	0.17	0.19	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.15	0.19	0.18	0.18	0.14	0.16	0.17
Dy	1.06	1.02	0.95	1.21	1.03	1.09	1.07	0.98	0.89	1.11	1.05	1.00	0.96	1.12	0.97	1.11	0.95	1.07	1.02
Ho	0.23	0.22	0.22	0.27	0.23	0.26	0.24	0.23	0.21	0.25	0.24	0.23	0.22	0.23	0.23	0.24	0.21	0.23	0.23
Er	0.67	0.66	0.55	0.75	0.61	0.66	0.63	0.58	0.56	0.70	0.66	0.59	0.58	0.63	0.59	0.63	0.60	0.58	0.61
Tm	0.09	0.09	0.07	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.10	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08
Yb	0.59	0.56	0.54	0.62	0.58	0.60	0.58	0.55	0.54	0.61	0.60	0.58	0.53	0.61	0.56	0.57	0.50	0.56	0.54
Lu	0.09	0.09	0.08	0.10	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08
Hf	0.49	0.48	0.47	0.63	0.57	0.54	0.58	0.58	0.58	0.57	0.50	0.68	0.53	0.66	0.57	0.55	0.54	0.62	0.51
Ta	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03
Pb	1.92	1.52	1.71	2.29	1.97	2.01	2.15	2.17	2.04	4.59	1.87	2.04	1.84	4.01	2.25	2.11	2.01	2.04	1.89
Th	0.35	0.27	0.32	0.38	0.37	0.40	0.42	0.35	0.39	0.44	0.35	0.40	0.39	0.38	0.40	0.40	0.32	0.33	0.31
U	0.06	0.04	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.06	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06
(La/Yb) _N	2.39	2.05	1.95	2.37	2.32	2.61	2.52	2.54	2.40	2.47	2.23	2.48	2.40	2.27	2.56	2.48	2.60	2.29	2.37
δEu	1.04	0.92	0.90	1.00	0.99	0.98	0.98	0.96	1.07	1.02	0.99	0.99	1.08	1.00	0.96	0.98	0.99	0.97	1.05

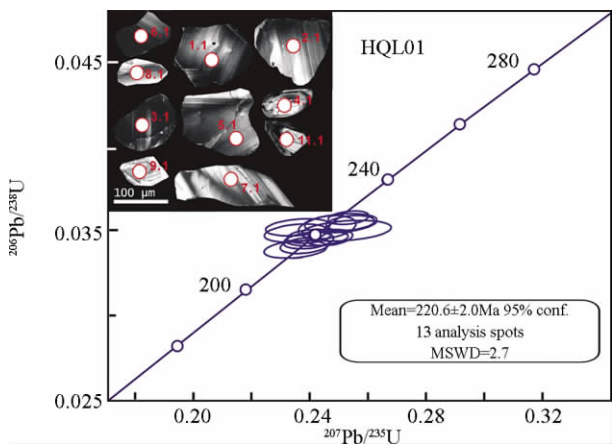


图 2 红旗岭超基性岩中代表性锆石的 CL 图像及锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄

Fig. 2 Representative cathodoluminescence (CL) images and the LA-ICP-MS U-Pb concordia age for the zircon grains from the Hongqiling ultramafic rock

旗岭超基性岩具有低的 SiO₂ 含量(43.22% ~ 44.48%), 在 TAS 图解中(图 3) 落在苦橄玄武岩区, 低 K₂O (0.10% ~ 0.17%) 在 SiO₂-K₂O 相关图解中(图 4) 所有样品落在低钾拉斑系列, Na₂O 含量范围为 0.15% ~ 2.13%, Al₂O₃ = 3.63% ~ 4.16%, MgO = 29.23% ~ 30.38% (Mg[#] = 83 ~ 84) (表 2) 。在 Harker 图(图 5) 中, MgO 与 TiO₂、Al₂O₃、CaO、K₂O 和 P₂O₅ 有明显的负相关关系(图 5c-e, g, h) , 而与 Fe₂O₃^T 具有正相关关系(图 5b) 。

在稀土元素球粒陨石标准化(Sun and McDonough, 1989) 图解中(图 6a) , 所有的样品都表现出轻稀土略富集的右倾型特征((La/Yb)_N = 1.95 ~ 2.61) , 没有明显的 Eu 异常(δEu = 0.90 ~ 1.08) 。在微量元素原始地幔标准化(Sun and McDonough, 1989) 蛛网图中(图 6b) , 所有的样品都富集大离子亲石元素 Rb 和 Sr, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr 和 Ti, 并强烈富集 Pb。

表 4 红旗岭超基性岩(样品 HQL01) 锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Zircon hafnium isotopic composition of Hongqiling ultramafic rock (Sample HQL01)

测点号	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	Age (Ma)	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	0.025540	0.000718	0.001024	0.000028	0.282911	0.000029	220	0.282907	4.9	9.6	484	639	-0.97
2	0.031638	0.001233	0.001244	0.000048	0.282995	0.000048	220	0.282989	7.9	12.5	367	453	-0.96
3	0.012471	0.000312	0.000498	0.000012	0.282957	0.000021	220	0.282955	6.5	11.3	413	531	-0.99
4	0.021134	0.000327	0.000854	0.000012	0.283021	0.000023	220	0.283018	8.8	13.5	326	389	-0.97
5	0.036922	0.000357	0.001460	0.000012	0.282985	0.000023	220	0.282979	7.5	12.1	384	477	-0.96
6	0.033766	0.000178	0.001329	0.000007	0.283046	0.000032	220	0.283040	9.7	14.3	294	337	-0.96
7	0.041203	0.001003	0.001562	0.000035	0.282959	0.000024	220	0.282953	6.6	11.2	422	536	-0.95
8	0.034651	0.000612	0.001373	0.000023	0.283032	0.000029	220	0.283027	9.2	13.8	314	369	-0.96
9	0.014131	0.000082	0.000588	0.000003	0.282971	0.000022	220	0.282969	7.0	11.8	394	500	-0.98
10	0.029371	0.000073	0.001170	0.000002	0.282966	0.000025	220	0.282961	6.9	11.5	407	516	-0.96
11	0.017341	0.000098	0.000661	0.000004	0.282970	0.000019	220	0.282967	7.0	11.7	397	504	-0.98
12	0.022327	0.000086	0.000874	0.000004	0.283046	0.000028	220	0.283042	9.7	14.4	291	333	-0.97
13	0.026503	0.000250	0.001006	0.000007	0.282991	0.000020	220	0.282987	7.7	12.4	370	459	-0.97

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \{ [\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{S}} - (\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{CHUR}} - (\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$; $t_{\text{DM1}} = 1 / \lambda \times \ln \{ 1 + [\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{S}} - (\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{DM}} \} / [(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{S}} - (\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{DM}} \}$; $t_{\text{DM2}} = 1 / \lambda \times \ln \{ 1 + [(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{S}} - (\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{DM},t}] / [(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{C}} - (\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{DM}} \}$ + t ; $f_{\text{Lu/Hf}} = (\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{S}} / (\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{CHUR}} - 1$;

The $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ and $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ratios of chondrite and depleted mantle at the present are 0.282772 and 0.0332, 0.28325 and 0.0384, respectively (Blichert-Toft and Albarede 1997; Griffin *et al.* 2000). $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Soderlund *et al.* 2004). $(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}]_{\text{C}} = 0.015$, t = crystallization age of zircon

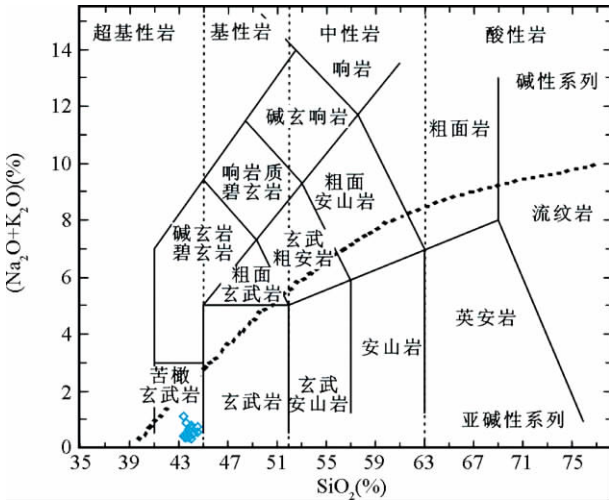


图 3 红旗岭超基性岩 TAS 图解

Fig. 3 TAS diagrams of the Hongqiling ultramafic rocks

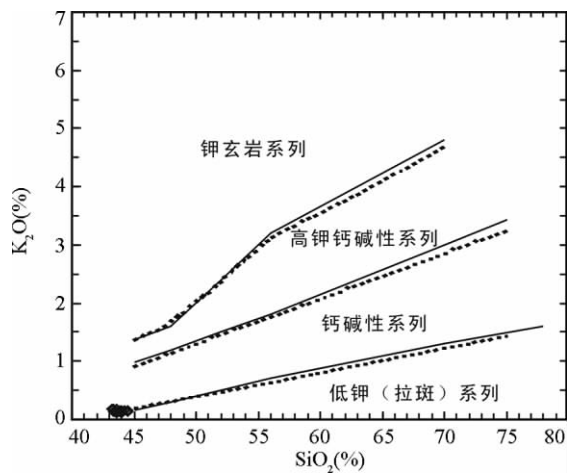


图 4 红旗岭超基性岩 SiO₂-K₂O 图解

Fig. 4 SiO₂ vs. K₂O diagram of the Hongqiling ultramafic rocks

3.3 锆石 Hf 同位素组成

本次实验标准锆石 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测定结果是 0.282296 ± 22 , 该值与目前用溶液法获得的值在误差范围内一致 (0.282306 ± 8 ; Woodhead *et al.*, 2004)。Hf 同位素分析结果见表 4 和图 7, 所有锆石颗粒的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 显示锆石在形成以后具有较少的放射成因 Hf 的积累(杨进辉等 2006b), 因此所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成(吴福元等 2007b)。13

个点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围为 0.282907 ~ 0.283042, 加权平均值为 0.282980 ± 21 ($2\sigma, n = 13$)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(220\text{Ma})$ 范围为 9.6 ~ 14.4 (表 4、图 7), 平均值为 12.3, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 范围为 333 ~ 639Ma (表 4), 平均值为 465Ma。

3.4 Sr-Nd 同位素组成

红旗岭超基性岩体的 Sr-Nd 同位素组成(表 5) 显示, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在 0.70448 ~ 0.70465 之间, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70394 \sim$

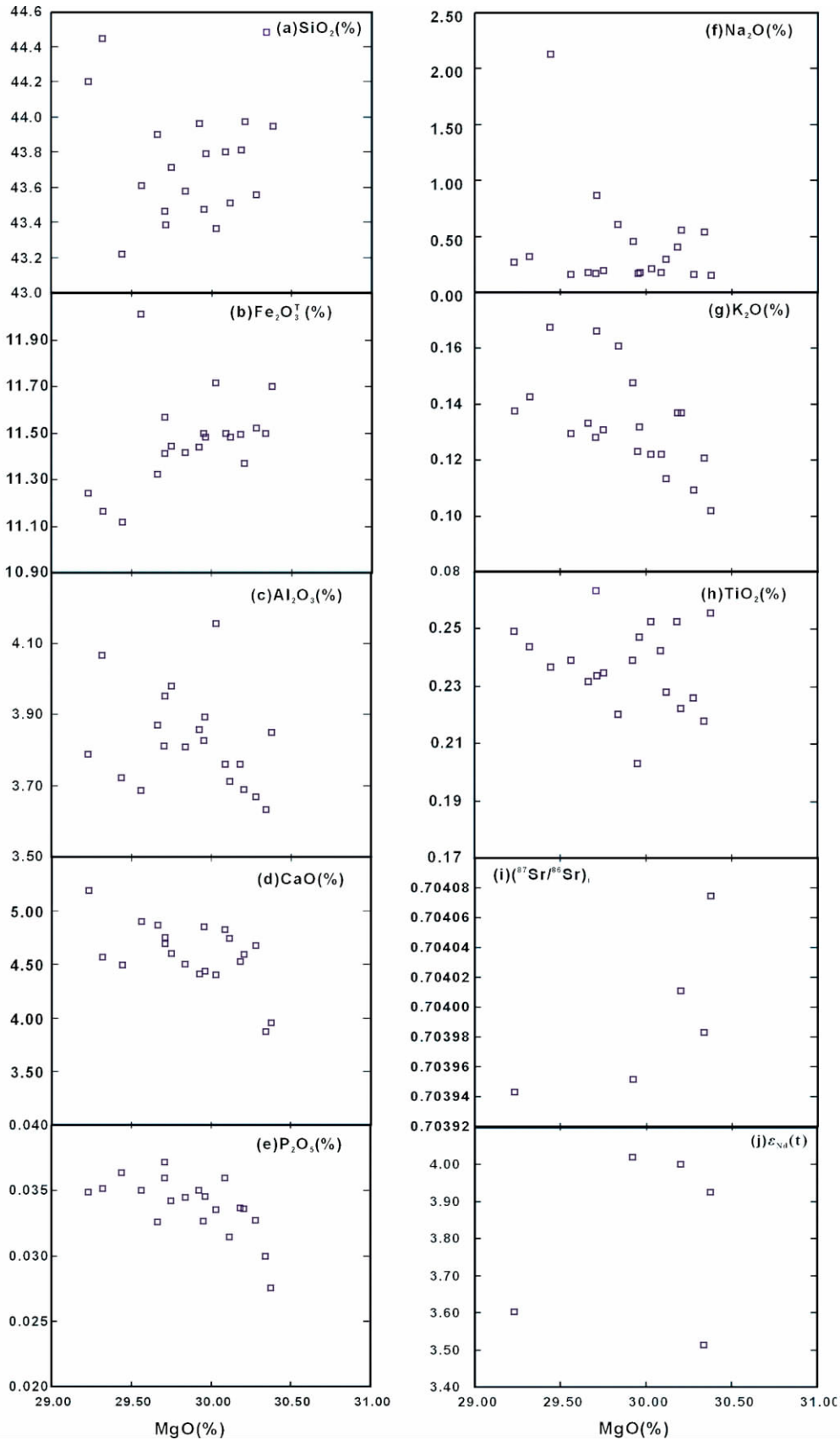


图5 红旗岭超基性岩 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams of the Hongqiling ultramafic rocks

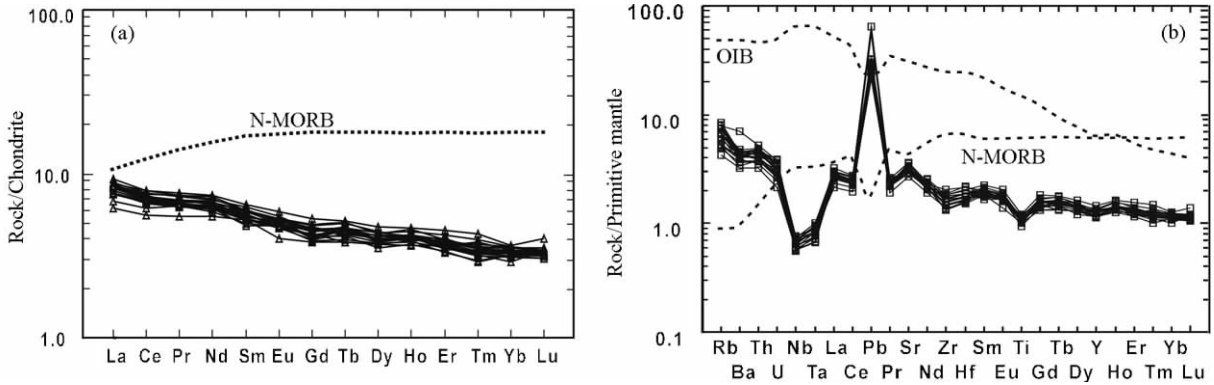


图6 红旗岭超基性岩稀土元素配分模式(a)和微量元素蛛网图(b) (据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) for Hongqiling ultramafic rocks (after Sun and McDonough, 1989)

表5 红旗岭超基性岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 5 Sr and Nd isotopic compositions of Hongqiling ultramafic rocks

样品号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87}{86}Rb$	$\frac{87}{86}Sr$	2σ	$\left(\frac{87}{86}Sr\right)_i$	$\frac{147}{144}Sm$	$\frac{143}{144}Nd$	2σ	$\left(\frac{143}{144}Nd\right)_i$	$\epsilon_{Nd}(t)$
HQLF-02	0.9	2.88	2.72	61.0	0.1289	0.704478	6	0.704075	0.1814	0.512556	9	0.512015	3.9
HQLF-03	0.8	2.57	3.24	56.1	0.1669	0.704505	6	0.703983	0.1884	0.512535	3	0.511999	3.5
HQLF-12	0.8	2.94	4.78	67.8	0.2037	0.704589	4	0.703951	0.1661	0.512561	4	0.512020	4.0
HQLF-14	0.9	3.12	5.16	66.3	0.2249	0.704647	3	0.703943	0.1734	0.512539	6	0.512028	3.6
HQLF-17	0.8	2.81	3.93	61.8	0.1838	0.704586	5	0.704011	0.1710	0.512560	4	0.512008	4.0

注: Chondrite Uniform Reservoir (CHUR) values ($\frac{87}{86}Rb/\frac{86}{86}Sr = 0.0847$, $\frac{87}{86}Sr/\frac{86}{86}Sr = 0.7045$, $\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd = 0.1967$, $\frac{143}{144}Nd/\frac{144}{144}Nd = 0.512638$) are used for the calculation. $\lambda_{Rb} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$ (Steiger and Jäfer, 1977); $\lambda_{Sm} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ year}^{-1}$ (Lugmair and Harti, 1978)

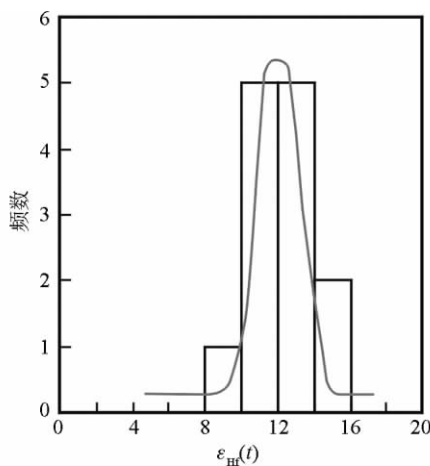


图7 红旗岭超基性岩 Hf 同位素组成

Fig.7 Zircon Hf isotopic compositions of Hongqiling ultramafic rock

0.70408, $\frac{143}{144}Nd/\frac{144}{144}Nd = 0.51254 \sim 0.51256$, $\epsilon_{Nd}(t) = 3.5 \sim 4.0$ 之间, 在 $\left(\frac{87}{86}Sr/\frac{86}{86}Sr\right)_i - \epsilon_{Nd}(t)$ 相关图解中所有测试样品均投在亏损源区。

4 讨论

4.1 结晶分异

红旗岭超基性岩体具有较高的 Mg ($MgO = 29.23\% \sim 30.38\%$, $Mg^\# = 83 \sim 84$) 以及相容元素 Cr ($2500 \times 10^{-6} \sim 2890 \times 10^{-6}$)、Co ($106 \times 10^{-6} \sim 124 \times 10^{-6}$) 和 Ni ($1040 \times 10^{-6} \sim 1240 \times 10^{-6}$) 含量, 暗示该超基性岩石来源于分异程度相对较低的岩浆 (Liu *et al.*, 2008)。在 Harker 图解中 (图 5), MgO 与 $Fe_2O_3^T$ 之间的正相关关系, 表明超基性岩浆在上升侵位过程中同时经历了橄榄石和斜方辉石的分离结晶作用, 而 MgO 与 TiO_2 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 以及 CaO 之间具有负的相关关系, 暗示含 Ti 矿物 (金红石、钛铁矿和榍石)、磷灰石和单斜辉石不是主要的结晶相, 同时也没有明显的斜长石的分离结晶, 这同稀土配分图解中没有明显的 Eu 负异常相一致。

4.2 源区性质与部分熔融

红旗岭超基性岩 SiO_2 含量 ($43.22\% \sim 44.48\%$) 较低, 表明它来源于超基性地幔源区 (Zhang *et al.*, 1995; Kato *et al.*, 1997; Gao *et al.*, 1998a, b)。其较低的 Sr 同位素初始

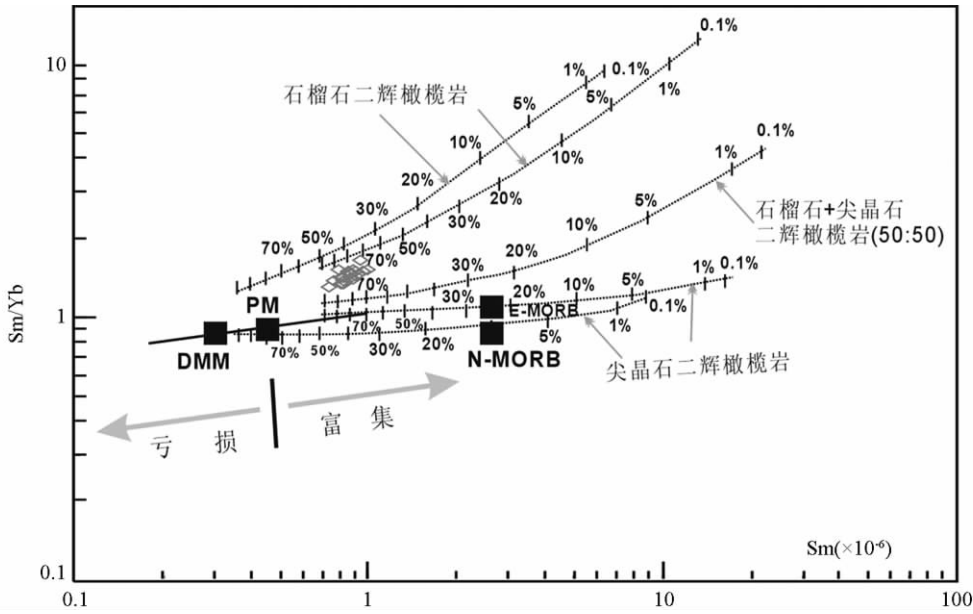


图 8 红旗岭超基性岩 Sm/Yb-Sm 相关图解

熔融曲线为尖晶石二辉橄榄岩(模式及熔体模式: ol 0.530 + opx 0.270 + cpx 0.170 + sp 0.030 and ol 0.060 + opx 0.280 + cpx 0.670 + sp 0.110) (据 Kinzler, 1997) 和石榴子石二辉橄榄岩(模式及熔体模式: ol 0.600 + opx 0.200 + cpx 0.100 + gt 0.100 and ol 0.030 + opx 0.160 + cpx 0.880 + gt 0.090) (据 Walter, 1998); 矿物/基质分配系数以及 DMM 引自 McKenzie and O’Nions (1991, 1995); PM, N-MORB 和 E-MORB 组成引自 Sun and McDonough (1989); 每条曲线上的数字对应于给定地幔源区的部分熔融程度

Fig. 8 Sm/Yb vs. Sm diagram of Hongqiling ultramafic rocks

Melt curves are drawn for spinel-hornblende (with mode and melt mode of ol 0.530 + opx 0.270 + cpx 0.170 + sp 0.030 and ol 0.060 + opx 0.280 + cpx 0.670 + sp 0.110, respectively; after Kinzler, 1997) and for garnet-hornblende (with mode and melt mode of ol 0.600 + opx 0.200 + cpx 0.100 + gt 0.100 and ol 0.030 + opx 0.160 + cpx 0.880 + gt 0.090, respectively; after Walter, 1998); Mineral/matrix partition coefficients and DMM are from the compilation of McKenzie and O’Nions (1991, 1995); PM, N-MORB and E-MORB compositions are from Sun and McDonough (1989); Tick marks on each curve (or line) correspond to degrees of partial melting for a given mantle source

比值 0.70394 ~ 70408, 以及正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(3.5 ~ 4.0) 均表明该岩体来源于亏损地幔源区的部分熔融。然而由稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素原始地幔标准化图解(图 6a, b) 可看出红旗岭超基性岩的元素组成与软流圈地幔来源的 N-MORB 有明显的差异, 因此, 我们认为红旗岭超基性岩不是来自亏损的软流圈地幔而是来自岩石圈地幔, 但其同位素显示亏损的特点, 所以可能的解释为该区的岩石圈地幔为新生的, 但随后经历了一定程度的不相容元素的富集作用 (Wu *et al.*, 2004)。

一般来说, 全岩稀土含量主要受地幔组成以及部分熔融程度来控制, 所以稀土元素的丰度和比值可以被广泛地用于对幔源岩石源区特征及地幔熔融的程度限定 (Johnson, 1998; Zhao and Zhou, 2007; Liu *et al.*, 2010b)。稀土元素在地幔橄榄岩的熔融过程中属于中等不相容元素 (Johnson, 1998), 所以它们的浓度和比值不会受地幔亏损和流体混入的明显影响 (Pearce and Peate, 1995; Münker, 2000)。此外, 地幔橄榄岩熔融过程中初始熔体中的 Yb 含量主要受控于残留的石榴石 (Johnson, 1998)。由地幔橄榄岩部分熔融并伴随有石榴石残留而形成的熔体具有低的 Yb 含量和高的

LREE(如 La 和 Sm) /Yb 比值; 考虑到稀土模式由源区组成的富集和亏损来确定, 尖晶石二辉橄榄岩源区部分熔融则会形成相对平坦的熔融趋势, 因为尖晶石中 La ($D_{spinel/melt} = 0.01$), Sm ($D_{spinel/melt} = 0.01$) 和 Yb ($D_{spinel/melt} = 0.01$) (McKenzie and O’Nions, 1991) 的分配系数相似。基于上述讨论, 在 Sm/Yb-Sm 图解中(图 8), 研究区超基性岩的 Sm/Yb 比值较尖晶石二辉橄榄岩熔融曲线高, 而与石榴石二辉橄榄岩熔融曲线相吻合。此外, 对微量元素的模拟计算表明研究区超基性岩为高度的部分熔融(50% ~ 70%) 的产物。这种高程度部分熔融同样被超基性岩较低的 La/Sm (1.84 ~ 2.48) 和 $(La/Yb)_N$ (1.95 ~ 2.61) 比值所证实, 因为较低程度的部分熔融将导致 La/Sm 和 La/Yb 的强烈分异, 而高度的部分熔融后这种分异将逐渐减弱, 同时超基性岩较高的 MgO 含量和 $Mg^\#$ (83 ~ 84) 以及较低的稀土含量 ($\sum REE = 12.36 \sim 16.72$) 也暗示原始岩浆经过了较高度部分熔融, 因为在地幔橄榄岩部分熔融过程中铁优先进入熔体中, 随着熔融程度的增高, 岩浆中的镁含量逐渐升高。

4.3 地壳混染和流体交代

幔源岩浆在上升或者侵位过程中通常会受到不同程度

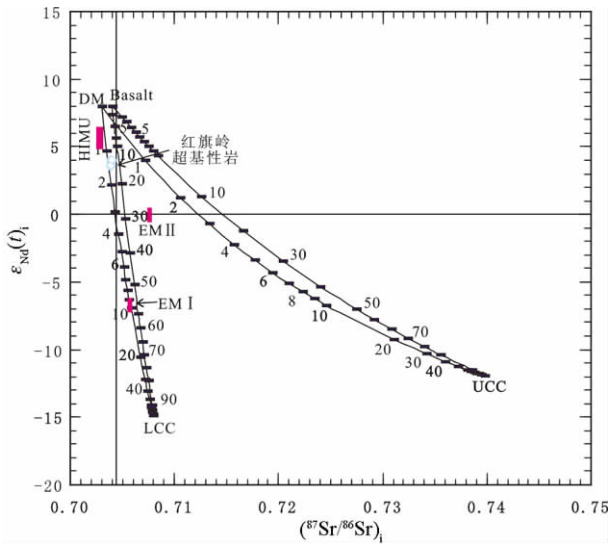


图9 红旗岭超基性岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) $_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解

其中数字表示地壳物质参与的比例,计算采用的参数 $\text{Nd}(\times 10^{-6})$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\text{Sr}(\times 10^{-6})$ 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值如下:软流圈地幔(DM)分别为1.2、+8、20和0.703;玄武岩分别为15、+8、200和0.704;上地壳(UCC)分别为30、-12、250和0.740(据Jahn *et al.*, 1999);下地壳(LCC)分别为20、-15、230和0.708(据Wu *et al.*, 2000)

Fig. 9 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) $_i$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for Hongqiling ultramafic rocks

The numbers indicate the percentages of participation of the crustal materials. The calculated parameters of $\text{Nd}(\times 10^{-6})$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, $\text{Sr}(\times 10^{-6})$ and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ are 1.2, +8, 20, and 0.703 for asthenospheric mantle (DM); 15, +8, 200, and 0.704 for basalt; 30, -12, 250, and 0.740 for upper continental crust (UCC) (after Jahn *et al.*, 1999); 20, -15, 230, 0.708 for lower continental crust (LCC). All data derive from Wu *et al.* (2000a)

地壳物质的混染(Mohr, 1987) 红旗岭超基性岩富集大离子亲石元素(Rb、Sr)和轻稀土元素,亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr和Ti),且具有比原始地幔($\text{Ta}/\text{La} = 0.06$, Wood *et al.*, 1979)低的Ta/La比值(0.02)。以上特征表明在成岩过程中可能存在地壳物质的混染。然而地壳混染通常会引起玄武质岩石明显的Sr-Nd同位素变化,从而导致MgO和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 之间正的相关关系,以及MgO和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 之间负的相关关系(Liu *et al.*, 2010b),但是这种关系在红旗岭超基性岩体中并不存在,暗示红旗岭超基性岩岩浆在上升侵位过程中不可能受到大量地壳物质的混染。另外,红旗岭超基性岩具有较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.70394~0.70408),正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (3.5~4.0)和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (9.6~14.4)(表4、表5、图9),同样表明地壳混染的程度不大。同时,我们采用两端元混合计算方式来检验是否存在陆壳物质的混染。以亏损地幔与上地壳作为两端元以及亏损地幔与下地壳作为两端元分别进行混合计算,结果同样表明成岩过程中没有受到上地壳物质的参与,下地

壳物质的混染也不明显(混染程度为1%~2%)(图9)。除此之外,地壳混染程度也可以通过 $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ 比值来衡量(Qi and Zhou, 2008),红旗岭超基性岩的 $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ 比值(2.8~4.3)与下地壳(4.6)和上地壳(28)(Taylor and McLennan, 1985)相比都较低,暗示不可能有大量地壳物质的混染。综上所述,红旗岭超基性岩的地球化学特征(如相对富集Rb、Sr和Pb)主要继承自地幔源区。

锆石Hf同位素体系因其较高的封闭温度、较高的Hf含量和极低的Lu/Hf比值等优越性能够获得其形成时准确的Hf同位素组成(吴福元, 2007b; 胡芳芳等, 2007),从而用来指示岩浆源区性质以及混合过程(Liu *et al.*, 2010a; Griffin *et al.*, 2002; Kemp and Hawkesworth, 2006; Yang *et al.*, 2006a)。红旗岭超基性岩体具有较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值且较为均一(表4、图7),暗示原始母岩浆来自单一的源区。

已有的研究表明,俯冲板块脱水作用所释放的流体较大程度地影响地幔楔中亲湿岩浆元素(Rb、K、Sr、Ba、U、Pb)的含量(Regelous, 1997; Johnson and Plank, 1999),而高场强元素因在水中的溶解度较小而相对亏损。因此,我们认为红旗岭超基性岩相对富集大离子亲石元素(Rb、Sr)和亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr和Ti)的特征,与源区存在流体的交代作用有关。东北地区的构造演化主要受到古亚洲洋和古太平洋构造域的控制,虽然两者转换的时间目前还存在争议,但一般认为发生在晚古生代-早中生代时期(吴福元和曹林, 1999; 张兴洲等, 2006; 彭向东等, 1999),但直到晚侏罗世-早白垩世,随着太平洋板块向西偏北方向与欧亚大陆块发生碰撞挤压(任收麦和黄宝春, 2002),太平洋俯冲对东北地区的影响才逐渐显现。因此,我们认为研究区超基性岩源区最可能受到了来自古亚洲洋俯冲沉积物析出流体的交代作用影响。

4.4 成岩机制

目前,东北地区的构造演化争议最大的是古亚洲洋最后闭合的时间和地点,综合各种地质和地球物理资料,兴安造山带诸多陆块在晚二叠世前已拼合成一体,随后作为一个统一的古陆块,先后于晚二叠世和早中侏罗世,完成了与华北陆块和西伯利亚板块的拼贴碰撞过程(张兴洲等, 2006)。

对红旗岭地区的研究表明,胡兰群角闪岩相变质作用发生在约240Ma,同时红旗岭北部同碰撞花岗岩的锆石U-Pb年龄为 $246 \pm 4\text{Ma}$,因此推测华北克拉通和佳木斯地块的碰撞可能发生在早三叠世(Wu *et al.*, 2004)。晚三叠世是东北地区A型花岗岩岩浆活动的重要阶段(Wu *et al.*, 2002),而A型花岗岩作为构造环境识别的重要岩石学标志主要形成于伸展的构造背景中(贾小辉等, 2009),表明东北地区在晚三叠世已处于伸展的背景下。研究区超基性岩锆石U-Pb年龄为 $220.6 \pm 2.0\text{Ma}$,与A型花岗岩同期,应该同属于造山后伸展拉张环境下的产物。因此,关于红旗岭超基性的岩石成因,我们认为:随着华北克拉通和佳木斯地块的碰撞拼合,

直接导致东北地区岩石圈(下地壳和岩石圈地幔)的垂向加厚和相变(榴辉岩)随后由于重力不稳定发生下地壳和岩石圈地幔的拆沉,从而导致岩石圈的拉张减薄和软流圈上涌,受到古亚洲洋俯冲沉积物析出流体改造的先存亏损的岩石圈地幔发生减压部分熔融,产生原始岩浆,原始岩浆在上升过程中经历了不同程度的橄榄石和斜方辉石等矿物的分离结晶,最后在地壳深部侵位形成了研究区超基性岩。

5 结论

(1) 锆石 U-Pb 年龄表明研究区超基性岩形成于 220.6 ± 2.0 Ma, 属于印支晚期岩浆活动的产物。

(2) 主、微量元素研究表明,研究区超基性岩属于亚碱性-低钾拉斑系列。综合地球化学研究表明,研究区超基性岩来源于受到古亚洲洋俯冲沉积物析出流体改造的亏损岩石圈地幔(石榴石二辉橄榄岩)的高程度($>70\%$)部分熔融。

(3) 结合东北地区的构造演化历史,研究区超基性岩应为佳木斯地块和华北克拉通碰撞造山后伸展拉张阶段的产物,伴随着岩石圈的拉张减薄,热的软流圈物质快速上涌,上覆的先存亏损岩石圈地幔发生减压部分熔融,原始岩浆上升侵位过程中经历了橄榄石和斜方辉石等矿物的分离结晶作用,但上升过程中没有受到明显地壳物质的混染。

致谢 刘勇胜教授和胡兆初博士在锆石 U-Pb 定年中给予了帮助,李才教授、迟效国教授和邱殿明博士在野外工作中给予了帮助,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243–258
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. 1993. *Regional Geology of Heilongjiang Province*. Beijing: Geological Publishing House, 347–438 (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1988. *Regional Geology of Jilin Province*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- DePaolo DJ. 1988. *Neodymium Isotope Geochemistry*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 76–80
- Dong YS, Fan JZ, Yang YC and Sun DY. 2004. Study on the metallogenic feature and ore genesis of Hongqiling copper-nickel deposit, Jilin Province. *Geoscience*, 18(2): 197–202 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Zhao ZD and Hu YK. 1998a. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1959–1975
- Gao S, Zhang BR, Jin ZM, Kern H, Luo TC and Zhao ZD. 1998b. How mafic is the lower continental crust? *Earth and Planetary Science Letters*, 106: 101–117
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Acherbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4: 133–147
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY. 2002. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237–269
- Guo F, Nakamura E, Fan WM *et al.* 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing in Yanji area, NE China. *Journal of Petrology*, 48(4): 661–692
- Guo F, Fan WM, Gao XF, Li CW, Miao LC, Zhao L and Li HX. 2010. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China: Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth. *Lithos*, 120: 563–578
- Hu FF, Fan HR, Yang JH, Zhai MG, Xie LW, Yang YH and Liu XM. 2007. Petrogenesis of Gongjia gabbros-diorite in the Kunyushan area, Jiaodong Peninsula: Constraints from petro-geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 369–380 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu FY and Hong DW. 1999. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from East Central Asia. In: Kumar A and Bhaskar S (eds.). *Indian Academy of Science (Gopalan Festschrift Volume)*, 108
- Jia XH, Wang Q and Tang GJ. 2009. A-type granites: Research progress and implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 465–480 (in Chinese with English abstract)
- Johnson KTM. 1998. Experimental determination of partition coefficients for rare earth and high-field-strength elements between clinopyroxene, garnet, and basaltic melt at high pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133: 60–68
- Johnson MC and Plank T. 1999. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments. *Geochem. Geophys. Geosys.*, 1: paper no. 1999GC000014
- Kato T, Enami A and Zhai M. 1997. Ultrahigh-pressure marble and eclogite in the Su-Lu ultrahigh-pressure terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 169–182
- Kemp AIS and Hawkesworth CJ. 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226: 144–162
- Kinzler RJ. 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to midocean ridge basalt petrogenesis. *Journal of Geophysical Research*, 102: 853–874
- Lugmair GW and Harti K. 1978. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth Planetary Science Letters*, 39: 349–357
- Liu S, Hu RZ, Gao S, Feng CX, Qi L, Zhong H, Xiao TF, Qi YQ, Wang T and Coulson IM. 2008. Zircon U-Pb geochronology and major, trace elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of mafic dykes in western Shandong Province, east China: Constraints on their petrogenesis and geodynamic significance. *Chemical Geology*, 255: 329–345
- Liu S, Hui RZ, Feng CX, Feng GY, Yu XF, Li Cai, Jia DC, Qi YQ and Wang T. 2009. Zircon U-Pb age, Hf isotopic compositions of Dapuchaihe adakites in eastern Jilin Province and their significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3137–3148 (in Chinese with English abstract)
- Liu S, Hu RZ, Gao S, Feng CX, Feng GY, Coulson IM, Li C, Wang C and Qi YQ. 2010a. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Permian granodiorites and associated gabbros in the Songliao Block, NE China and implications for growth of juvenile crust. *Lithos*, 114: 423–436
- Liu S, Su WC, Hu RZ, Feng CX, Gao S, Coulson IM, Wang T, Feng GY, Tao Y and Xia Y. 2010b. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of alkaline ultramafic dykes from southwest Guizhou Province, SW China. *Lithos*, 114: 253–264
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257: 34–43

- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang D. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537 – 571
- Ludwig KR. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, Version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1 – 70
- McKenzie DP and O'Nions RK. 1991. Partial melts distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32: 1021 – 1091
- McKenzie DP and O'Nions RK. 1995. The source regions of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 36: 133 – 159
- Melcher F, Meisel T, Puhl J and Koller F. 2002. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: Constraints from geochemistry. *Lithos*, 65: 69 – 112
- Meng FX. 1992. The characteristics of the progressive metamorphism zone in argillaceous rock in Hulan Group and its geological significance in the central part of Jilin Province. *Jilin Geology*, 11 (3): 60 – 70 (in Chinese with English abstract)
- Mohr PA. 1987. Crustal Contamination in mafic Sheets: A summary. In: Halls HC and Fahrig WC (eds.). *Mafic dyke Swarms*. Special Publication-Geological Association of Canada, 34: 75 – 80
- Münker C. 2000. The isotope and trace element budget of the Cambrian Devil River Arc System, New Zealand: Identification of four source components. *Journal of Petrology*, 41: 759 – 788
- Pearce JW and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251 – 285
- Peng XD, Zhang MS and Li XM. 1999. The evolution of Paleozoic tectonic paleogeography in Jilin and Heilongjiang orogenic belt. *World Geology*, 18(3): 24 – 28 (in Chinese with English abstract)
- Qi L and Zhou MF. 2008. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China. *Chemical Geology*, 248: 83 – 103
- Regelous M, Collerson, KD, Ewart A and Wendt JI. 1997. Trace element transport rates in subduction zones: Evidence from Th, Sr and Pb isotope data for Tonga-Kermadec arc lavas. *Earth Planetary Science Letter*, 150: 291 – 302
- Ren SM and Huang BC. 2002. Preliminary study on post-Late Paleozoic kinematics of the main blocks of the paleo-Asian Ocean. *Progress in Geophysics*, 17(1): 113 – 120 (in Chinese with English abstract)
- Shi XM and Lan YQ. 1985. The metamorphic sequence of Hulan Group, Hongqiling, Jilin Province. *Journal of Changchun College of Geology*, 4: 39 – 46 (in Chinese with English abstract)
- Soderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311 – 324
- Steiger RH and Jäger E. 1977. Subcommission on geochronology, convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology. *Earth Planetary Science Letters*, 36: 359 – 362
- Sun DY, Wu FY, Lin Q and Lu XP. 2001. Petrogenesis and crust-mantle interaction of early Yanshanina Baishishan platon in Zhanguang Range. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 227 – 235 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, London, 313 – 345
- Tang WL and Yang YC. 2007. Geochemical characteristics of mafic-ultramafic rocks and their geological significance in Hongqiling mines of Jilin. *Global Geology*, 26(2): 164 – 172 (in Chinese with English abstract)
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. The continental crust: Its composition and evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 46
- Walter MJ. 1998. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere. *Journal of Petrology*, 39: 29 – 60
- Wang HZ and Mo XX. 1995. An outline of the tectonic evolution of China. *Episodes*, 18: 6 – 16
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Quadt AV, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19: 1 – 23
- Wood DA, Tameu J, Varet J, Saunders AN, Bouhault H, Joron JL, Treuil M and Cann JR. 1979. Geochemistry of basalts drills in the North Atlantic by IPOD Leg 49: Implications for mantle heterogeneity. *Earth Planetary Science Letters*, 42: 77 – 97
- Woodhead J, Hergt J, Sheley M, Eggins S and Kemp R. 2004. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation. *Chemical Geology*, 209: 121 – 135
- Wu FY, Ye M and Zhang SH. 1995. The geodynamic model of the Manzhouli-Suifenhe geoscience transect. *Journal of Earth Science*, 20(5): 535 – 539 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY and Cao L. 1999. Some important problems of geology in northeastern Asia. *World Geology*, 18(2): 1 – 13 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA and Sun DY. 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89 – 113
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde SA. 2002. A-type granites in Northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143 – 173
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66: 241 – 273
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67: 191 – 204
- Wu FY, Simon AW, Zhang GL and Sun DY. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, (23): 781 – 797
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234: 105 – 126
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007a. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217 – 1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007b. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta petrologica sinica*, 23(2): 185 – 220 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Ge WC, Zhang YB, Grant ML, Wilde SA and Jahn BM. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Science*, 41: 1 – 30
- Xi AH, Ren HM, Zhang BF, Wang YX and Zhi XJ. 2004. Characteristics on ore minerals in Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(3): 338 – 343 (in Chinese with English abstract)
- Xi AH, Gu LX, Li XJ, Ye SQ and Zheng YC. 2005. Discussion on metallogenic epoch of Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit, Jilin Province. *Mineral Deposits*, 24(5): 521 – 526 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Chung SL, Wilde SA and Chu MF. 2006a. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89: 89 – 106
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Xie LW and Liu XM. 2006b. In-situ U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons from volcanic rocks of the Houcheng and Zhangjiakou formations in the Zhang-Xuan area, Northeast China. *Earth Science*, 31(1): 71 – 80 (in Chinese with English abstract)
- Yang YC, Sun DY, Ma ZH and Xu WL. 2005. The forming mechanisms

- of Hongqiling mafic and ultramafic intrusive bodies and Cu-Ni sulfide deposits. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(5): 593–600 (in Chinese with English abstract)
- Ye M, Zhang SH and Wu FY. 1994. The classification of the Paleozoic tectonic units in the area crossed by Manzhouli-Suifenghe geoscience transect. *Journal of Changchun University Earth Science*, 24(3): 241–245 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GL and Wu FY. 2005. Geochronology significances of the post-orogenic mafic-ultramafic rocks in Hongqiling area of Jilin Province, NE China. *Seismology and Geology*, 27(4): 600–608 (in Chinese with English abstract)
- Zhang RY, Hirajima T, Banno S, Cong B and Liou JG. 1995. Petrology of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in southern Sulu region, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 13: 659–675
- Zhang XZ, Yang BJ, Wu FY and Liu GX. 2006. The lithosphere structure in the Hinggan-Jihei (Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China. *Geology in China*, 33(4): 816–823 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Ling WL and Li FL. 2008. Element and Sr-Nd isotopic mobility during weathering process of the Nanhuaian-Cambrian sedimentary strata in the Eastern Three Gorges and its geochemical implication. *Earth Science*, 33(3): 301–312 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JH and Zhou MF. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research*, 152: 27–47
- Zhao XX, Coe RS, Zhou YX, Wu HR and Wang J. 1990. New palaeomagnetic results from northern China: Collision and suturing with Siberia and Kazakstan. *Tectonophysics*, 181: 43–81
- 附中文参考文献**
- 董耀松, 范继璋, 杨言辰, 孙德有. 2004. 吉林红旗岭铜镍矿床的地质特征及成因. *现代地质*, 18(2): 197–202
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 347–438
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 翟明国, 谢烈文, 杨岳横, 柳小明. 2007. 鲁东崑崙山地区官家辉长闪长岩成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约. *岩石学报*, 23(2): 369–380
- 吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 贾小辉, 王强, 唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义. *大地构造与成矿学*, 33(3): 465–480
- 刘燊, 胡瑞忠, 冯彩霞, 冯光英, 于晓飞, 李才, 贾大成, 齐有强, 王涛. 2009. 大蒲柴河 adakites 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义. *岩石学报*, 25(12): 3137–3148
- 孟繁兴. 1992. 吉林中部呼兰群泥质岩递进变质特征及其地质意义. *吉林地质*, 11(3): 60–70
- 彭向东, 张梅生, 李晓敏. 1999. 吉黑造山带古生代构造古地理演化. *世界地质*, 18(3): 24–28
- 任收麦, 黄宝春. 2002. 晚古生代以来古亚洲洋构造域主要块体运动学特征初探. *地球物理学进展*, 17(1): 113–120
- 施性明, 兰玉琦. 1985. 吉林省红旗岭呼兰群变质岩系的研究. *长春地质学院学报*, 4: 39–46
- 孙德有, 吴福元, 林强, 路孝平. 2001. 张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用. *岩石学报*, 17(2): 227–235
- 唐文龙, 杨言辰. 2007. 吉林红旗岭镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征及地质意义. *世界地质*, 26(2): 164–172
- 吴福元, 叶茂, 张世红. 1995. 中国满洲里-绥芬河地学断面域的地球动力学模型. *地球科学*, 20(5): 535–539
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题. *世界地质*, 18(2): 1–13
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185–220
- 郝爱华, 任洪茂, 张宝福, 王永祥, 支学军. 2004. 吉林省红旗岭铜镍硫化物矿床矿石学特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(3): 338–343
- 郝爱华, 顾连兴, 李绪俊, 叶青松, 郑远川. 2005. 吉林红旗岭铜镍硫化物矿床的成矿时代讨论. *矿床地质*, 24(5): 521–526
- 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 谢烈文, 柳小明. 2006. 冀北张宣地区后城组、张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素. *地球科学*, 31(1): 71–80
- 杨言辰, 孙德有, 马志红, 许文良. 2005. 红旗岭镁铁-超镁铁岩侵入体及铜镍硫化物矿床的成岩成矿机制. *吉林大学学报(地球科学版)*, 35(5): 593–600
- 叶茂, 张世红, 吴福元. 1994. 中国满洲里-绥芬河地学断面域古生代构造单元及其地质演化. *长春科技大学学报*, 24(3): 241–245
- 张广良, 吴福元. 2005. 吉林红旗岭地区造山后镁铁-超镁铁岩体的年代测定及其意义. *地震地质*, 27(4): 600–608
- 张兴洲, 杨宝俊, 吴福元, 刘国兴. 2006. 中国兴安-吉黑地区岩石圈结构基本特征. *中国地质*, 33(4): 816–823
- 张永清, 凌文黎, 李方林. 2008. 陕东地区南华纪-寒武纪地层风化过程元素及 Sr-Nd 同位素演化特征及其地球化学意义. *地球科学*, 33(3): 301–312