

Study on Magmatic Sequence of the Pobei Basic-Ultrabasic Complex in the Northeast Tarim Plate

Mingwei Wang¹, Li Jia², Binglong Chen², Jiangang Jiao^{2,3}

¹Shaanxi Provincial Mineral Resources Survey and Evaluation Center, Xi'an Shaanxi

²School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering Education, Ministry of Education, Xi'an Shaanxi

Email: 15929905398@qq.com

Received: Nov. 8th, 2018; accepted: Nov. 22nd, 2018; published: Nov. 29th, 2018

Abstract

The Pobei complex, located in the northeastern margin of the Tarim plate, can be divided into five magma units, corresponding to five lithofacies: gabbro facies, gabbro-norite facies, olivine gabbro facies, peridotite facies and gabbro apophysis. The mineralogical characteristics of rocks from each unit are different, indicating that the Pobei complex is a product of different magma pulses. The average crystallization temperatures of olivine in peridotite facies, olivine gabbro facies and gabbro-norite facies are 1303°C, 1280°C and 1204°C, respectively. The MgO content of the primary magma of peridotite facies is 18%, suggesting a picritic magma. The MgO contents of the primary magma of gabbro facies and gabbro-norite facies are 8.61% and 8.74%, respectively, all of which are basaltic magma. Trace element diagrams and Sr-Nd isotope indicate that contamination existed during the magmatic evolution process, and the degree of contamination in gabbro facies and gabbro-norite facies is significantly higher than olivine gabbro facies and peridotite facies. The magma sources of gabbro facies, gabbro-norite facies and peridotite facies are depleted lithosphere mantle, and the gabbro facies and gabbro-norite facies are formed by lower degree of partial melting, while the peridotite facies is higher than them.

Keywords

Primary Magma, Magma Process, Magma Unit, Magma Sub-Sequence, Pobei Complex

塔里木板块东北部坡北基性 - 超基性岩体岩浆序列研究

王明卫¹, 贾力², 陈炳龙², 焦建刚^{2,3}

¹陕西省矿产资源调查评审指导中心, 陕西 西安

²长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安

³西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安

Email: 15929905398@qq.com

收稿日期: 2018年11月8日; 录用日期: 2018年11月22日; 发布日期: 2018年11月29日

摘要

坡北岩体位于新疆塔里木板块东北部, 可划分为五个岩浆单元, 对应五个岩相, 分别为辉长岩相、辉长苏长岩相、橄榄辉长岩相、橄榄岩相和辉长岩岩枝。各单元岩石之间的矿物学特征存在差异, 说明坡北岩体是不同期次岩浆侵入的产物。模拟计算获得橄榄岩相、橄榄辉长岩相和辉长苏长岩相岩石中橄榄石的平均结晶温度分别为: 1303℃、1280℃和1204℃; 橄榄岩相的原生岩浆的MgO含量为18%, 属苦橄质岩浆; 辉长岩相岩石原生岩浆MgO含量为8.61%, 辉长苏长岩相岩石原生岩浆MgO含量为8.74%, 均为玄武质岩浆。微量元素图解与Sr、Nd同位素指示岩浆演化过程中存在同化混染作用, 辉长岩相和辉长苏长岩相受到的混染作用明显高于橄榄岩相和橄榄辉长岩相; 辉长岩相、辉长苏长岩相和橄榄岩相的岩浆源区均为亏损岩石圈地幔, 较低的部分熔融程度形成辉长岩相和辉长苏长岩相, 较高的部分熔融程度形成橄榄岩相。

关键词

原生岩浆, 岩浆过程, 岩浆单元, 岩浆子序列, 坡北岩体

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塔里木板块东北部坡北基性 - 超基性岩体出露面积约 180 km², 其中坡一、坡七、坡十超基性侵入体中赋存铜镍硫化物矿床。近年来, 部分学者对坡北岩体的形成时代、矿物特征、岩浆演化过程以及岩石成因等进行了探讨。姜常义等[1]获得坡北岩体中辉长岩锆石年龄为 274 ± 4 Ma, 并认为坡北岩体中苦橄质和玄武质原生岩浆分别生成于洋岛型地幔源区和亏损型大陆岩石圈地幔[2]; Xia *et al.* [3]计算得到坡一侵入体的原始岩浆源区为亏损地幔, 并在演化过程中受到了俯冲交代改造过的岩石圈地幔或新生地壳组分的影响; Xue *et al.* [4]认为该地区基性 - 超基性岩体的形成与地幔柱的活动无关, 是由于岩石圈的拆沉和软流圈上涌的产物。且坡北岩体经历了广泛的同化混染作用[1] [2] [5] [6]。本次研究依托于 1:5 万地质专题填图, 对坡北岩体中各种岩相开展了系统的岩石地球化学与矿物地球化学研究, 从原生岩浆成分、同化混染程度、矿物学特征等前人仍然存在争论的方面, 探讨了坡北岩浆过程与岩浆序列, 认为橄榄岩相、橄榄辉长岩相和辉长苏长岩相均来源于亏损的岩石圈地幔, 橄榄岩相形成于高程度部分熔融, 其原生岩浆为苦橄质岩浆, 而橄榄辉长岩相和辉长苏长岩相均形成于低程度部分熔融, 其原生岩浆为玄武质岩浆, 在上升侵位过程中受到了明显的地壳混染。

2. 岩体地质特征

坡北岩体位于新疆塔里木板块东北缘, 白地洼 - 淤泥河断裂东南侧, 呈相互连通的北东向延展岩盆

状，围岩主体为中元古界白湖群黑云母片岩、黑云石英片岩、二云石英片岩、大理岩等(图 1)。岩体内广泛分布有大理岩、黑云母片岩、石英片岩及交代形成的矽卡岩的围岩残留顶盖和顶垂体，发生明显的热接触变质作用。

通过 1:5 万专题地质填图和室内研究，根据不同岩相之间的相互接触关系将坡北基性 - 超基性岩体划分为 5 个岩浆单元，对应五个岩相，分别为辉长岩相，含少量淡色辉长岩与斜长岩；辉长苏长岩相，主要由辉长苏长岩、橄榄辉长苏长岩组成，边部含透镜状橄榄辉石岩；橄榄辉长岩相；橄榄岩相，主要由纯橄岩、含长二辉橄榄岩、二辉橄榄岩和暗色橄榄辉长岩等组成，坡一和坡十岩(矿)体即形成于该阶段；辉长岩岩枝，主要为细粒辉长岩，仅在局部呈岩枝状产出。坡北岩体中还有斜长玢岩脉、辉绿岩脉、花岗岩脉等各种后期侵入岩脉。

坡北岩体的主体是辉长岩相；辉长苏长岩相主要产出在岩体南部；橄榄辉长岩相多呈大透镜状侵入到辉长岩中；橄榄岩相中偶见橄榄辉长岩包体(图 2(a)、图 2(b))。说明辉长岩形成的最早，接下来是橄榄辉长岩，橄榄岩的形成相对较晚。辉长岩岩枝特征与坡北岩体中大面积出露的辉长岩相虽然侵入关系上有早晚明显差别，但是矿物组合特征一致，后面地球化学研究中将二者合并，按照岩相开展讨论。因此，坡北杂岩体形成可分为 5 个阶段：辉长岩、橄榄辉长苏长岩、淡色辉长岩和斜长岩构成岩体主体，为第一阶段产物；橄榄辉长苏长岩为第二阶段产物；纯橄岩、含长二辉橄榄岩、二辉橄榄岩和橄榄辉长岩构成第三阶段；斜长岩、淡色辉长岩和少量细粒辉长岩构成第四阶段；第五阶段为石英闪长玢岩和正长花岗岩岩枝和岩脉[1] [7]。

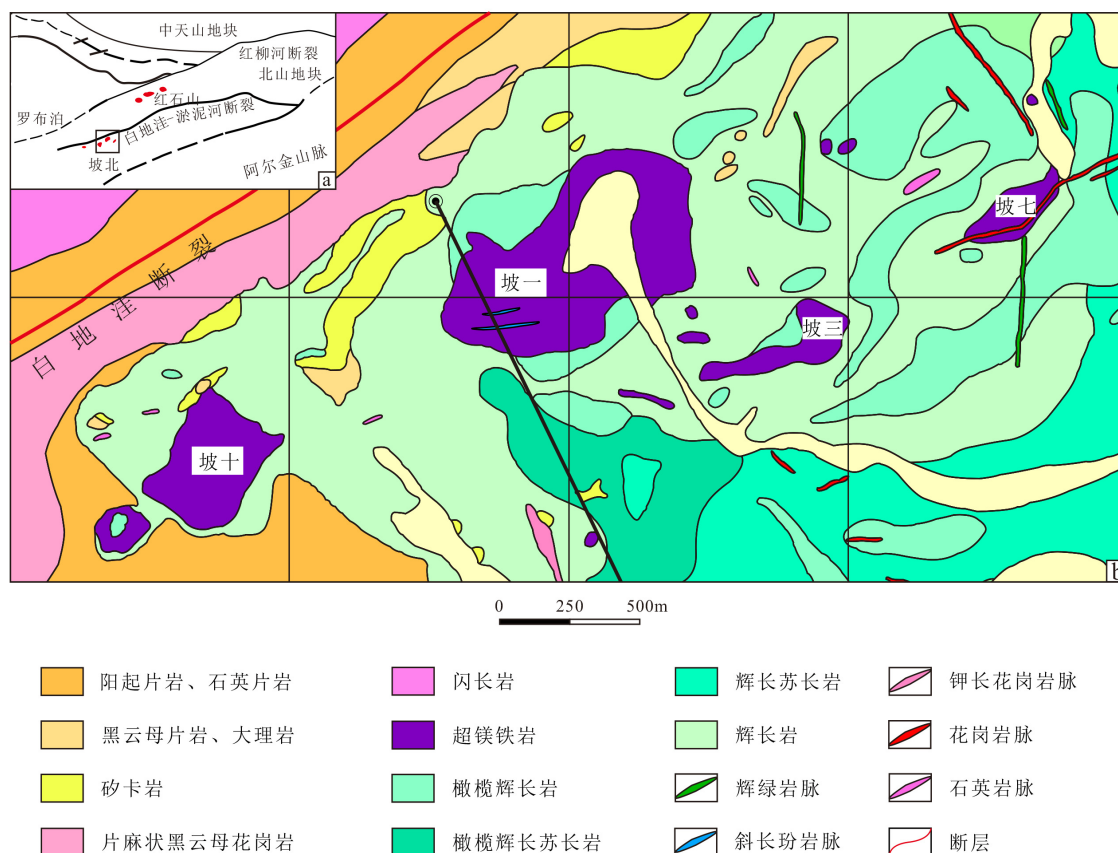


Figure 1. Regional geological map of the northeastern Tarim plate (a) and the Pobei Complex (b)
 图 1. 塔里木板块东北部区域地质图(a)与坡北岩体地质图(b)

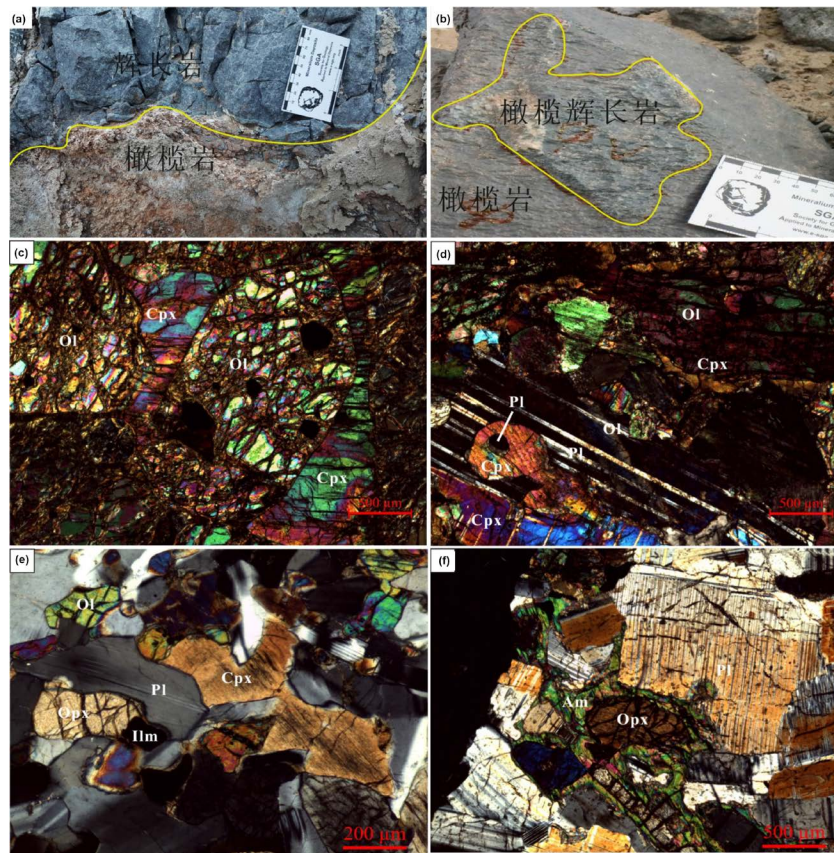
3. 矿物地球化学特征

3.1. 橄榄石

橄榄石的粒径及矿物化学组成呈明显的变化趋势，具体表现为：粒径、Fo 值及 Ni 含量橄榄岩 > 橄榄辉长岩 > 橄榄辉长苏长岩，纯橄岩 Fo 值在 89.8~90.7 之间，Ni 含量较高，平均值为 2661.2×10^{-6} ；二辉橄榄岩 Fo 值在 83.7~84.5 之间，Ni 含量平均值为 770.1×10^{-6} ；含长单辉橄榄岩 Fo 值在 81.4~82.0 之间，Ni 含量平均值为 1301.8×10^{-6} ；橄榄辉长岩 Fo 值平均值为 80.3~81.5 之间，Ni 含量平均值为 992.7×10^{-6} ；橄榄辉长苏长岩 Fo 值平均值为 63.5~65.9 之间，Ni 含量较低(表 1)。总体呈现从橄榄岩相到橄榄辉长岩相到辉长苏长岩相橄榄石的 Fo 和 Ni 含量逐渐减小的趋势。

坡北岩体中辉长苏长岩相、橄榄辉长岩相和橄榄岩相这三个岩相中橄榄石的 Fo 值与 FeO 呈现出明显的相关性，与 SiO₂、CaO 和 Ni 的相关性不明显，但是较为明显的是，橄榄岩相中橄榄石的 SiO₂、CaO 和 Ni 含量最高，且分布范围较大，而辉长苏长岩相中橄榄石的 SiO₂、CaO 和 Ni 含量最低，橄榄辉长岩相中橄榄石的 SiO₂、CaO 和 Ni 含量在橄榄岩相和辉长苏长岩相之间(图 3)。

根据橄榄石结晶温度计算公式： $t(^{\circ}\text{C}) = 1066 + 12.068 \times \text{Mg}^{\#} + \frac{312.3 \times (\text{Mg}^{\#})^2}{10^4}$ [8] [9]



(a) 辉长岩与橄榄辉长苏长岩侵入界线；(b) 辉长岩与橄榄岩侵入界线；(c) 纯橄岩中的包橄结构、堆晶结构；(d) 橄榄辉长岩中的堆晶结构、含长结构；(e) 橄榄辉长苏长岩中的堆晶结构及钛铁矿；(f) 苏长岩中的辉长结构以及斜方辉石的角闪石反应边。Ol-橄榄石；Opx-斜方辉石；Cpx-单斜辉石；Pl-斜长石；Am-角闪石；Ilm-钛铁矿。

Figure 2. Field and microscopic photo of samples from the Pobei intrusion
图 2. 坡北岩体野外及镜下特征

经计算, 橄榄岩相、橄榄辉长岩相和辉长苏长岩相岩石中橄榄石的平均结晶温度分别为: 1303°C、1280°C和 1204°C, 呈现出随 Fo 值降低递减的趋势。

3.2. 辉石

坡北岩体中的单斜辉石多为透辉石, 少量的普通辉石, 且辉长苏长岩相岩石的辉石的 Fs 值明显大于橄榄岩和橄榄辉长岩, 橄榄岩相及橄榄辉长岩相中的斜方辉石为古铜辉石, 辉长苏长岩相的斜方辉石基本都为紫苏辉石(表 1、图 4)。同时, 镜下发现橄榄岩相、橄榄辉长岩相及辉长岩相中的辉石粒径明显比辉长苏长岩相中的辉石粒径大(图 2)。

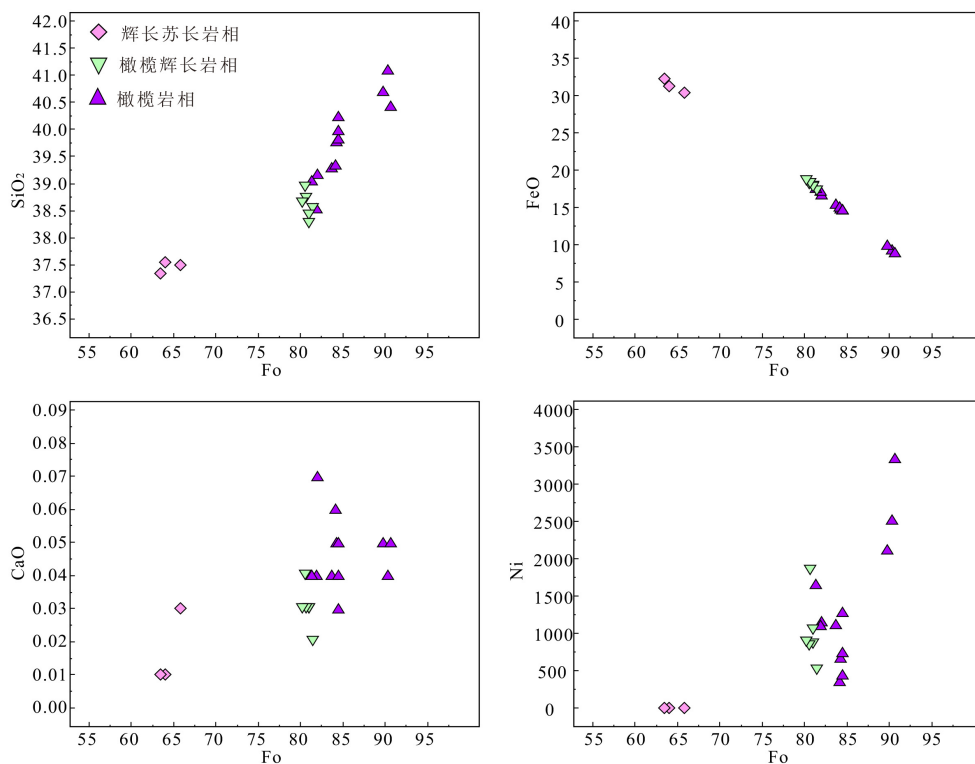


Figure 3. Correlation analysis of olivine composition for samples from the Pobei intrusion
图 3. 坡北岩体橄榄石成分相关性图解

单斜辉石的成分可以很好地反映母岩浆的成分特点[10], 且火成岩中 Si 与 Al 具互不相容的作用, 它们可以作为确定母岩浆类型的标型元素[10] [11]。在单斜辉石的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 图解上, 所有样品均落在亚碱性区域, 表明这四个岩相的母岩浆属亚碱性系列。在 $\text{Al}^{\text{IV}}\text{-Si}$ 图解上, 均位于拉斑玄武岩区, 表明坡北岩体的母岩浆应属拉斑玄武岩系列(图 4)。

3.3. 斜长石

斜长石在各类岩石中多呈填隙相, 半自形—他形短柱状、板状(图 2)。辉长岩相中斜长石牌号在 68.3~70.7 之间; 在辉长苏长岩相中斜长石牌号在 49.4~68.4 之间, 为拉长石; 在橄榄辉长岩相中斜长石牌号在 73.8~85.4 之间, 为培长石, 含长结构中被包裹的斜长石牌号较高, 最高可达 97, 为钙长石; 在橄榄岩相中斜长石牌号在 68.1~87.2 之间。(表 1、图 5)。坡北岩体中各类岩石的斜长石 SiO_2 与 An 和 Al_2O_3 的相关性较好, 呈负相关(图 5), 辉长苏长岩相中斜长石的 K_2O 含量又比其它岩石高(表 1)。

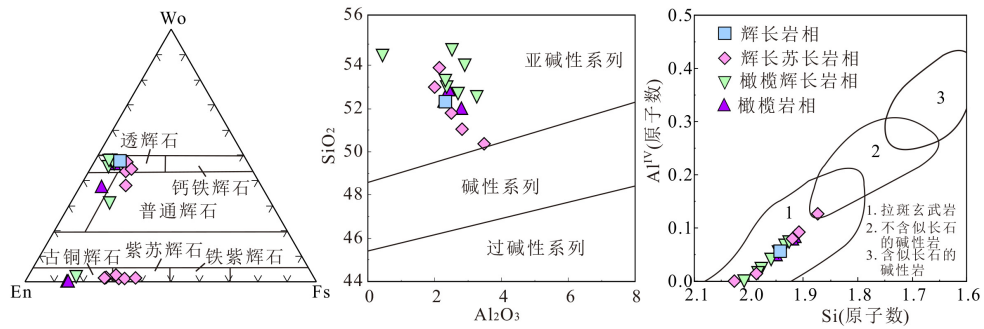


Figure 4. Classification diagram of pyroxene from the Pobei intrusion and relationship between $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}^{\text{IV}}\text{-Si}$ of clinopyroxene

图 4. 坡北岩体辉石分类图解及单斜辉石的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}^{\text{IV}}\text{-Si}$ 关系图

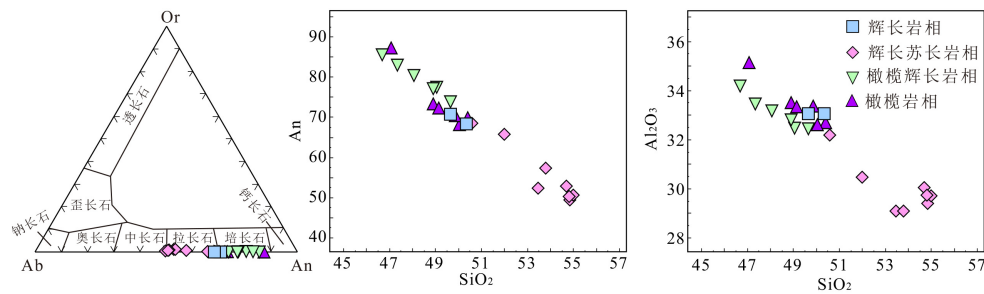


Figure 5. Classification diagram of plagioclase from the Pobei intrusion and relationship between plagioclase $\text{SiO}_2\text{-An}$ and $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

图 5. 坡北岩体斜长石分类图解及斜长石 $\text{SiO}_2\text{-An}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 关系图

4. 岩石地球化学特征

4.1. 主量元素

岩体 SiO_2 含量在 35.25%~50.51% 之间, 属碱性 - 超碱性岩类。橄榄岩相的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 的含量较低, 平均为 38.65%、3.57% 和 4.52%, 而 TFe_2O_3 和 MgO 含量较高, 平均为 11.85% 和 31.33%。橄榄辉长岩相的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 的含量较橄榄岩相高, 平均为 46.91%、17.82% 和 15.26%, TFe_2O_3 和 MgO 含量较橄榄岩相低, 平均为 5.09% 和 10.34%。辉长苏长岩相岩石的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 TFe_2O_3 的含量较橄榄辉长岩相高, 平均为 48.83%、15.96% 和 7.92%, CaO 和 MgO 含量较橄榄辉长岩相低, 平均为 12.56% 和 9.68%, TiO_2 含量较高, 平均为 0.82%, 最高达 2.34%。辉长岩的 SiO_2 、 TFe_2O_3 和 MgO 含量较辉长苏长岩相岩石低, 平均为 49.69%、5.41% 和 7.45%, CaO 和 Al_2O_3 含量较辉长苏长岩相岩石高, 平均为 13.57% 和 21.96%。整体岩石的 $\text{Mg}^\#$ 值在 0.59~0.87 之间(表 2)。

从主量元素相关性图解中可以发现, 橄榄岩相的演化主要受橄榄石的结晶分异控制, 其次为单斜辉石, 橄榄辉长岩相则同时受橄榄石, 单斜辉石和斜长石的结晶分异控制, 辉长岩相受单斜辉石和斜长石的结晶分异控制, 辉长苏长岩相受辉石和斜长石的结晶分异控制(图 6)。

4.2. 稀土与微量元素

橄榄岩相的稀土含量最低, $\Sigma \text{REE} = 3.11 \times 10^{-6} \sim 14.60 \times 10^{-6}$, 有一件纯橄岩样品有明显的铕异常, $\delta \text{Eu} = 1.79$, 其余橄榄岩样品基本没有铕异常, δEu 在 1 附近。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.70 \sim 1.50$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 0.52 \sim 1.37$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.88 \sim 1.46$, 轻重稀土元素之间、轻稀土元素内部和重稀土元素内部分馏均较弱, 这些岩石的稀土元素配分曲线呈近似平坦型(表 2)。

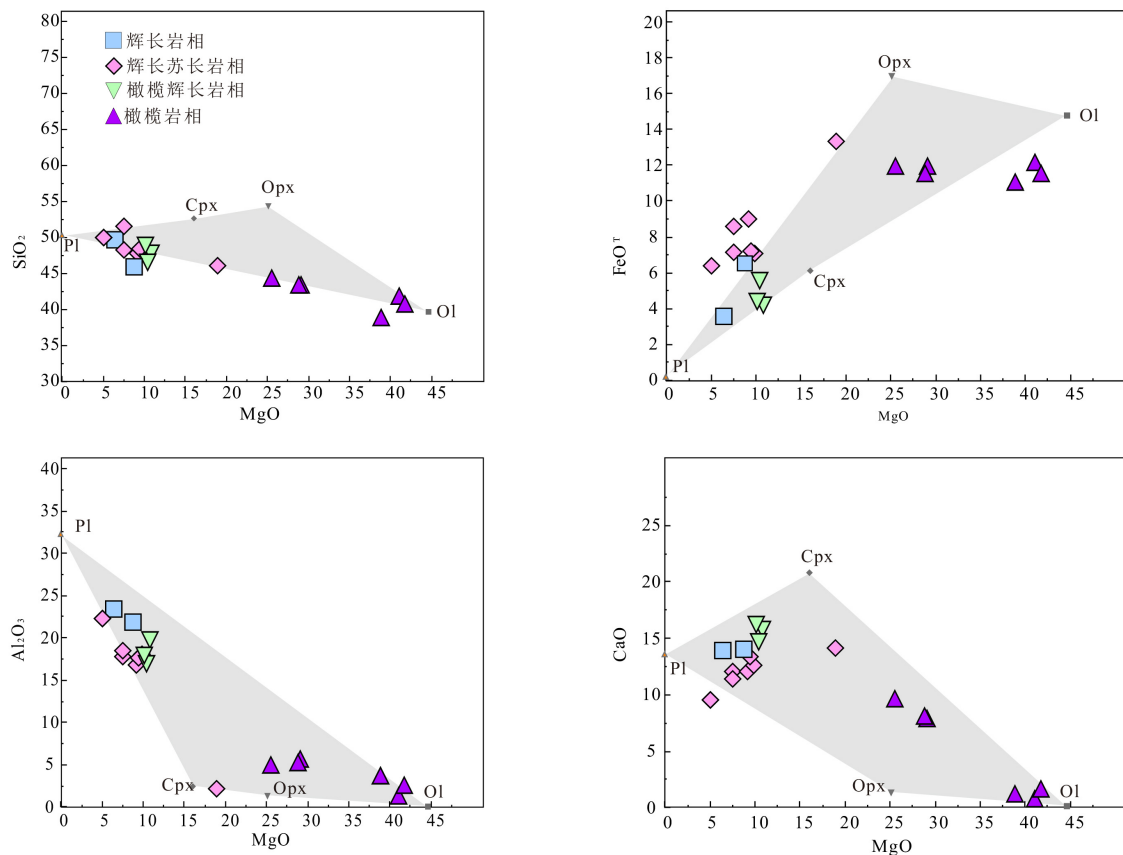


Figure 6. Correlation diagram of major elements of the Pobei intrusion
图 6. 坡北岩体主量元素相关图

橄榄辉长岩相的稀土含量较橄榄岩相高， $\Sigma \text{REE} = 8.85 \times 10^{-6} \sim 14.41 \times 10^{-6}$ ，铕异常较为明显， $\delta \text{Eu} = 1.56 \sim 1.91$ ，且其轻重稀土元素之间、轻稀土元素内部和重稀土元素内部分馏均较弱。这些岩石的稀土元素配分曲线呈近似平坦型。

辉长苏长岩相岩石的稀土含量较高， $\Sigma \text{REE} = 8.05 \times 10^{-6} \sim 22.84 \times 10^{-6}$ ，铕异常较为明显， $\delta \text{Eu} = 1.57 \sim 5.62$ ，样品的轻重稀土元素之间、轻稀土元素内部和重稀土元素内部分馏均较弱。稀土元素配分曲线均为近似平坦型。辉长岩相样品的稀土总含量 $\Sigma \text{REE} = 14.19 \times 10^{-6} \sim 23.21 \times 10^{-6}$ ，铕异常较为明显， $\delta \text{Eu} = 1.81 \sim 2.06$ ，稀土元素配分曲线呈较弱的轻稀土元素富集型(表 2)。

从微量元素配分曲线可以看出，所有岩石的不相容元素与原始地幔的比值在 0.1~10 之间，说明亏损大多数不相容元素，这些岩石共同的特点是均有明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素的负异常及亏损，可能是由于强烈的同化混染作用或形成于岛弧环境。Rb、Ba、Sr、U、Th 等大离子亲石元素的含量变化范围较大，由于这些元素的化学活泼性较强，说明有流体活动的参与。大多数样品都存在 Ti 的负异常。(图 7)。

5. 讨论

5.1. 岩浆序列特征

辉长岩相中单斜辉石主要为透辉石，斜长石牌号约为 70；辉长苏长岩相(橄榄辉长苏长岩、辉长苏长岩、苏长岩)中橄榄石 Fo 约为 64，Ni 含量极低，单斜辉石主要为透辉石，斜方辉石主要为紫苏辉石，斜

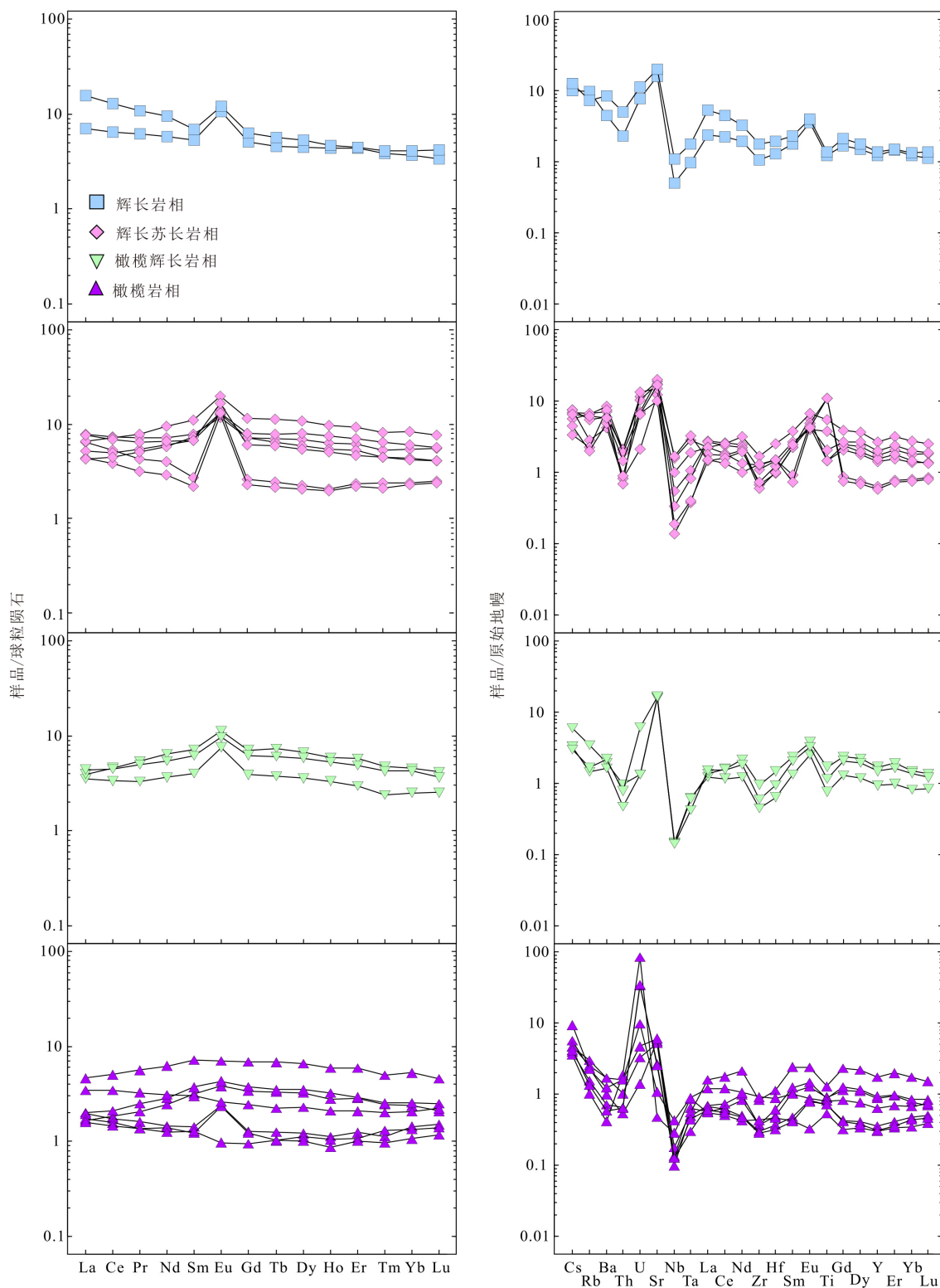


Figure 7. Chondrite normalized REE pattern and primitive mantle normalized trace element spider diagram of samples from the Pobei intrusion

图 7. 坡北岩体的球粒陨石标准化稀土元素分布模式和原始地幔标准化多元素蛛网图。(球粒陨石及原始地幔标准化值来自[12])

Table 1. Mineral composition of samples from the Pobei intrusion
表 1. 坡北岩体单矿物电子探针数据

样号	岩性	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	MgO	P ₂ O ₅	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	NiO	Total	Fo	Ni	种属	
P23-11	纯橄岩	0.00	0.00	9.33	49.19	0.00	0.12	0.02	0.04	0.00	41.09	0.00	0.32	100.11	90.4	2514.5	镁橄榄石	
		0.00	0.00	9.88	49.04	0.00	0.16	0.00	0.05	0.00	40.70	0.04	0.27	100.14	89.8	2121.6	贵橄榄石	
		0.00	0.00	8.94	48.90	0.00	0.07	0.00	0.05	0.00	40.43	0.00	0.43	98.81	90.7	3347.4	镁橄榄石	
		0.00	0.00	15.50	44.53	0.06	0.20	0.02	0.04	0.09	39.30	0.00	0.14	99.89	83.7	1123.7	贵橄榄石	
Ib-25	二辉橄 榄岩	0.03	0.00	14.87	44.72	0.00	0.21	0.00	0.05	0.03	39.78	0.01	0.09	99.80	84.3	667.9	贵橄榄石	
		0.05	0.02	15.12	45.23	0.00	0.32	0.02	0.06	0.06	39.35	0.02	0.05	100.28	84.2	361.5	贵橄榄石	
		0.05	0.00	14.63	44.85	0.00	0.21	0.00	0.05	0.01	39.82	0.01	0.06	99.69	84.5	440.0	贵橄榄石	
PB6	二辉橄 榄岩	0.00	0.00	14.66	44.92	0.05	0.18	0.01	0.04	0.00	39.98	0.00	0.16	100.00	84.5	1280.8	贵橄榄石	
		0.00	0.00	14.65	44.74	0.00	0.07	0.00	0.03	0.00	40.23	0.00	0.10	99.83	84.5	746.5	贵橄榄石	
Ib-21	含长单 辉橄 榄岩	0.00	0.00	16.74	42.91	0.03	0.29	0.00	0.07	0.02	39.18	0.01	0.15	99.40	82.0	1155.1	贵橄榄石	
		0.00	0.01	17.17	43.50	0.02	0.40	0.01	0.04	0.04	38.53	0.04	0.14	99.90	81.9	1100.1	贵橄榄石	
		0.04	0.02	17.60	43.29	0.00	0.10	0.01	0.04	0.02	39.05	0.00	0.21	100.37	81.4	1650.1	贵橄榄石	
PB7	橄辉 长岩	0.01	0.00	17.25	42.68	0.01	0.16	0.00	0.02	0.00	38.54	0.00	0.06	98.73	81.5	502.9	贵橄榄石	
		0.02	0.00	17.78	42.56	0.04	0.46	0.00	0.03	0.00	38.42	0.00	0.11	99.41	81.0	856.5	贵橄榄石	
		0.00	0.00	17.69	42.29	0.00	0.20	0.00	0.03	0.04	38.26	0.02	0.13	98.67	81.0	1045.1	贵橄榄石	
PB3	橄辉 长岩	0.00	0.00	18.02	42.01	0.00	0.24	0.04	0.04	0.04	38.94	0.00	0.11	99.44	80.6	832.9	贵橄榄石	
		0.00	0.00	18.14	42.55	0.00	0.22	0.00	0.03	0.00	38.72	0.02	0.23	99.92	80.7	1838.7	贵橄榄石	
PB5	橄辉 长 苏 长岩	0.00	0.00	18.53	42.47	0.00	0.27	0.03	0.03	0.00	38.64	0.01	0.11	100.09	80.3	880.1	贵橄榄石	
		0.00	0.00	31.23	31.11	0.01	0.37	0.00	0.01	0.00	37.54	0.00	0.00	100.27	64.0	0.0	透铁橄 榄石	
		0.00	0.00	32.14	31.37	0.02	0.28	0.00	0.01	0.01	37.33	0.00	0.00	101.16	63.5	0.0	透铁橄 榄石	
		0.00	0.00	30.35	32.93	0.01	0.38	0.00	0.03	0.09	37.48	0.01	0.00	101.26	65.9	0.0	透铁橄 榄石	
样号	岩性	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	MgO	P ₂ O ₅	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	NiO	Total	Wo	En	Fs	种属
Ib-25	二辉橄 榄岩	0.06	0.00	9.12	31.13	0.00	0.10	2.35	0.18	0.01	56.46	0.05	0.00	99.44	0.4	85.6	14.1	古铜辉 石
		0.07	0.02	9.55	31.26	0.00	0.22	2.33	0.23	0.00	56.44	0.04	0.00	100.15	0.4	85.0	14.6	古铜辉 石
Ib-21	含长单 辉橄 榄岩	0.33	0.02	6.79	18.64	0.00	0.18	2.29	17.92	0.01	52.36	0.41	0.55	99.49	37.8	54.8	7.4	普通辉 石
		0.33	0.00	4.36	15.82	0.00	0.09	2.43	22.32	0.05	52.86	0.54	0.49	99.30	46.8	46.1	7.1	透辉石
		0.37	0.00	4.41	15.14	0.03	0.12	2.81	22.05	0.11	52.00	0.52	2.18	99.74	48.1	46.0	5.9	透辉石
PB3	橄辉 长岩	0.04	0.00	12.10	29.78	0.02	0.18	1.63	1.09	0.00	54.82	0.30	0.27	100.21	2.1	81.4	16.4	古铜辉 石
		0.42	0.01	3.50	16.05	0.00	0.23	2.53	20.87	0.04	54.72	0.76	0.52	99.62	45.4	48.6	5.9	透辉石
		0.34	0.01	3.22	15.65	0.00	0.06	2.91	22.53	0.00	54.01	0.63	0.58	99.93	48.1	46.5	5.4	透辉石

Continued

		0.29	0.01	3.67	15.76	0.01	0.05	2.36	22.60	0.10	52.98	0.56	0.55	98.94	47.7	46.3	6.1	透辉石
		0.29	0.00	4.55	15.93	0.00	0.18	2.70	22.42	0.00	52.67	0.54	0.45	99.71	46.7	46.1	7.2	透辉石
PB7	橄榄辉长岩	0.43	0.00	3.92	15.69	0.00	0.16	3.27	22.58	0.03	52.53	0.51	0.50	99.62	47.7	46.1	6.2	透辉石
		0.13	0.00	3.66	17.08	0.00	0.03	0.44	24.13	0.05	54.46	0.10	0.03	100.12	47.9	47.2	4.9	透辉石
		0.21	0.00	8.47	19.53	0.00	0.00	2.32	15.31	0.00	53.28	0.40	0.18	99.69	31.2	55.4	13.5	普通辉石
		0.05	0.00	20.26	23.90	0.00	0.31	1.26	0.76	0.00	53.48	0.21	0.00	100.22	1.5	67.0	31.5	紫苏辉石
PB5	橄榄辉长苏长岩	0.43	0.00	8.10	14.08	0.03	0.21	2.82	21.28	0.00	51.04	1.07	0.26	99.34	45.8	42.1	12.1	透辉石
		0.46	0.00	9.42	14.41	0.03	0.20	3.48	20.03	0.00	50.35	1.27	0.22	99.86	43.6	43.7	12.7	透辉石
		0.02	0.00	18.50	23.39	0.03	0.38	1.14	1.32	0.05	54.56	0.15	0.05	99.59	2.7	67.4	29.9	紫苏辉石
		0.03	0.00	20.43	22.27	0.00	0.44	1.04	0.73	0.00	53.97	0.17	0.00	99.09	1.5	65.0	33.5	紫苏辉石
PB1	辉长苏长岩	0.00	0.00	23.03	21.26	0.02	0.29	1.22	0.80	0.04	52.63	0.17	0.00	99.45	1.7	61.2	37.2	紫苏辉石
		0.41	0.01	9.04	15.08	0.00	0.16	2.15	17.26	0.08	53.90	0.48	0.01	98.58	38.1	46.3	15.6	透辉石
		0.36	0.00	6.82	13.88	0.03	0.07	2.01	22.15	0.06	52.97	0.42	0.07	98.84	47.3	41.3	11.4	透辉石
		0.36	0.00	9.87	14.03	0.01	0.15	2.50	21.07	0.00	51.79	0.69	0.00	100.47	44.5	41.2	14.3	透辉石
		0.00	0.00	17.00	25.59	0.00	0.32	1.36	0.80	0.05	55.20	0.19	0.00	100.51	1.6	71.7	26.7	古铜辉石
Ib-10	苏长岩	0.00	0.00	17.11	25.26	0.00	0.43	1.31	0.89	0.00	54.90	0.18	0.00	100.07	1.8	71.2	27.0	古铜辉石
		0.01	0.00	16.71	25.52	0.00	0.20	1.13	0.78	0.08	55.07	0.22	0.05	99.76	1.6	72.0	26.4	古铜辉石
P23-4	辉长岩	0.27	0.01	5.31	14.84	0.00	0.15	2.33	22.73	0.03	52.29	0.53	0.69	99.20	47.8	43.4	8.7	透辉石
样号	岩性	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	MgO	P ₂ O ₅	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	NiO	Total	An	Ab	Or	种属
Ib-21	含长单辉橄榄岩	3.18	0.02	0.04	0.00	0.00	0.07	32.68	13.34	0.00	50.41	0.06	0.01	99.80	69.8	30.1	0.1	拉长石
		2.77	0.02	0.04	0.02	0.03	0.00	33.50	13.83	0.05	48.92	0.06	0.05	99.29	73.3	26.6	0.1	培长石
Ib-25	二辉橄榄岩	3.40	0.03	0.17	0.01	0.00	0.00	32.61	13.19	0.00	50.06	0.23	0.04	99.74	68.1	31.7	0.2	拉长石
		3.17	0.01	0.14	0.03	0.02	0.05	33.35	13.57	0.12	49.87	0.06	0.04	100.41	70.3	29.7	0.1	培长石
PB6	二辉橄榄岩	2.97	0.01	0.04	0.00	0.03	0.00	33.33	14.02	0.02	49.16	0.05	0.04	99.67	72.3	27.7	0.1	培长石
		1.24	0.00	0.14	0.01	0.02	0.00	35.12	15.42	0.00	47.08	0.02	0.00	99.05	87.2	12.7	0.0	培长石
		1.63	0.01	0.15	0.01	0.00	0.03	34.18	17.25	0.02	46.70	0.03	0.00	100.00	85.4	14.6	0.0	培长石
PB3	橄榄辉长岩	2.18	0.04	0.13	0.00	0.01	0.06	33.15	16.29	0.00	48.08	0.02	0.17	100.12	80.3	19.5	0.2	培长石
		1.89	0.02	0.18	0.01	0.00	0.01	33.43	16.74	0.00	47.36	0.02	0.08	99.73	82.9	17.0	0.1	培长石
		2.50	0.02	0.27	0.08	0.00	0.00	32.47	15.53	0.04	49.08	0.04	0.00	100.04	77.3	22.5	0.1	培长石
PB7	橄榄辉长岩	2.93	0.01	0.13	0.00	0.04	0.07	32.44	14.93	0.00	49.68	0.05	0.00	100.29	73.8	26.2	0.0	培长石
		2.55	0.00	0.18	0.01	0.08	0.00	32.79	15.49	0.00	48.92	0.08	0.00	100.11	77.0	23.0	0.0	培长石

Continued

PB5	橄榄辉 长苏长 岩	5.61	0.07	0.12	0.02	0.00	0.06	29.40	9.99	0.00	54.84	0.02	0.00	100.13	49.4	50.2	0.4	中长石
		3.80	0.05	0.17	0.00	0.04	0.00	30.45	13.26	0.00	52.00	0.07	0.01	99.83	65.7	34.0	0.3	拉长石
		3.32	0.06	0.17	0.03	0.00	0.00	32.19	13.10	0.00	50.59	0.05	0.01	99.51	68.4	31.3	0.3	拉长石
PB1	辉长苏 长岩	5.17	0.20	0.16	0.02	0.03	0.00	29.07	10.52	0.00	53.48	0.06	0.03	98.74	52.3	46.5	1.2	拉长石
		5.16	0.20	0.15	0.05	0.00	0.00	30.05	10.70	0.04	54.72	0.05	0.00	101.11	52.8	46.1	1.2	拉长石
		5.42	0.15	0.07	0.00	0.00	0.09	29.70	10.24	0.02	55.00	0.00	0.00	100.69	50.6	48.5	0.9	拉长石
IB-10	苏长岩	5.48	0.11	0.20	0.03	0.01	0.00	29.72	10.18	0.00	54.83	0.05	0.03	100.64	50.3	49.0	0.7	拉长石
		4.77	0.15	0.07	0.00	0.02	0.00	29.08	11.79	0.00	53.81	0.00	0.10	99.79	57.2	41.9	0.8	拉长石
P23-4	辉长岩	3.12	0.02	0.19	0.03	0.06	0.00	33.06	13.69	0.06	49.68	0.03	0.00	99.94	70.7	29.2	0.1	培长石
		3.38	0.02	0.28	0.00	0.00	0.00	33.06	13.24	0.00	50.37	0.03	0.00	100.37	68.3	31.6	0.1	拉长石

Table 2. Major and trace elements of rocks from the Pobei intrusion
表 2. 坡北岩体主微量元素数据

样号	P23-4	P23-6	P23-1	PB1	PB5	IB-10	IB-11	IB-7
岩性	辉长岩		辉长苏长岩		橄榄辉长苏长岩		苏长岩	
SiO ₂	48.25	44.73	47.89	50.51	47.34	49.99	48.33	47.77
TiO ₂	0.26	0.29	0.81	0.31	1.16	2.34	0.31	0.44
Al ₂ O ₃	22.72	21.20	17.61	18.03	16.63	22.17	17.82	17.41
TFe ₂ O ₃	3.80	7.01	9.38	7.71	9.84	7.01	7.75	7.85
MnO	0.08	0.10	0.14	0.13	0.15	0.10	0.10	0.13
MgO	6.29	8.61	7.51	7.42	9.20	5.10	9.82	9.35
CaO	13.46	13.68	11.89	11.16	11.88	9.46	12.45	13.13
Na ₂ O	2.21	1.77	3.74	2.60	2.90	3.56	2.43	2.69
K ₂ O	0.20	0.18	0.21	0.23	0.12	0.23	0.09	0.09
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02
LOI	1.73	1.92	0.23	0.17	0.07	0.10	0.41	0.32
TATOL	99.02	99.52	99.43	98.30	99.31	100.09	99.53	99.20
Mg [#]	0.77	0.71	0.61	0.66	0.65	0.59	0.7	0.70
m/f	3.28	2.43	1.59	1.91	1.85	1.44	2.51	2.36
Li	11.63	5.39	7.49	10.56	11.63	7.22	5.69	6.09
Be	0.31	0.27	0.30	0.27	0.27	0.30	0.17	0.15
Sc	12.35	7.56	23.99	21.74	22.45	6.59	17.31	20.76
V	96.63	67.17	283.87	130.42	214.95	180.12	138.40	168.25
Cr	541.14	365.32	23.43	75.40	413.68	123.97	483.32	412.68
Co	26.04	55.27	40.34	41.82	53.18	23.45	54.40	52.29

Continued

Ni	72.39	137.98	15.22	34.59	112.99	23.77	73.43	105.88
Cu	25.99	47.45	25.71	24.07	55.47	20.36	46.46	60.10
Zn	24.66	43.17	54.96	41.62	62.36	39.36	39.62	45.63
Ga	15.13	14.48	18.61	16.97	16.16	15.23	13.71	14.94
Rb	6.10	4.68	3.46	4.16	1.80	3.91	1.43	1.26
Sr	338.42	415.97	396.81	369.00	257.52	351.70	320.24	212.79
Y	5.62	6.33	7.89	6.43	12.07	2.60	6.98	9.18
Zr	11.78	20.10	12.20	7.50	18.59	14.66	6.61	8.13
Nb	0.36	0.78	0.39	0.24	0.71	1.19	0.10	0.13
Mo	0.12	0.33	0.27	0.11	0.13	0.14	0.21	0.12
Cd	0.05	0.09	0.13	0.07	0.10	0.05	0.11	0.11
In	0.02	0.02	0.04	0.03	0.05	0.02	0.03	0.03
Cs	0.32	0.40	0.24	0.18	0.24	0.21	0.11	0.14
Ba	31.11	57.97	42.18	59.19	29.82	40.69	51.70	34.14
La	1.65	3.68	1.87	1.81	1.55	1.04	1.22	1.01
Ce	3.98	7.84	4.54	4.22	4.36	2.37	3.06	2.75
Pr	0.57	1.01	0.67	0.60	0.73	0.29	0.50	0.47
Nd	2.64	4.36	3.32	3.02	4.31	1.34	2.77	2.64
Sm	0.78	1.03	1.16	0.99	1.65	0.32	1.00	1.09
Eu	0.60	0.68	0.67	0.95	1.11	0.71	0.73	0.74
Gd	1.01	1.26	1.44	1.21	2.30	0.45	1.42	1.60
Tb	0.17	0.20	0.25	0.21	0.41	0.08	0.23	0.28
Dy	1.09	1.31	1.68	1.33	2.67	0.51	1.45	1.96
Ho	0.24	0.25	0.34	0.28	0.53	0.11	0.30	0.41
Er	0.69	0.72	0.98	0.74	1.50	0.35	0.85	1.13
Tm	0.09	0.10	0.13	0.11	0.20	0.05	0.11	0.16
Yb	0.59	0.66	0.88	0.67	1.33	0.37	0.71	0.97
Lu	0.08	0.10	0.14	0.10	0.19	0.06	0.10	0.14
Hf	0.40	0.59	0.44	0.30	0.77	0.47	0.30	0.38
Ta	0.04	0.07	0.04	0.03	0.08	0.13	0.02	0.02
Pb	2.06	2.52	1.28	1.40	0.89	1.22	1.37	1.21
Bi	0.04	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Th	0.20	0.43	0.18	0.18	0.07	0.12	0.06	0.08
U	0.16	0.24	0.24	0.22	0.04	0.14	0.28	0.14
∑REE	14.19	23.21	18.07	16.21	22.84	8.05	14.46	15.37
δEu	2.06	1.81	1.57	2.63	1.73	5.62	1.87	1.71
(La/Yb) _N	1.88	3.77	1.45	1.83	0.79	1.92	1.17	0.70
(La/Sm) _N	1.32	2.24	1.00	1.14	0.59	2.01	0.76	0.58
(Gd/Yb) _N	1.37	1.54	1.33	1.46	1.40	0.99	1.62	1.33

Continued

样号	IB-20	PB7	PB3	PB4	P23-11	PB2	PB01-2	PB01-3	IB-21
岩性	橄榄辉长岩			纯橄岩		二辉橄长岩		含长单辉橄长岩	
SiO ₂	48.75	46.43	45.56	36.66	35.25	37.50	39.88	41.02	41.61
TiO ₂	0.25	0.16	0.36	0.10	0.14	0.16	0.18	0.18	0.26
Al ₂ O ₃	17.87	19.13	16.45	1.08	3.32	2.30	5.16	4.89	4.64
TFe ₂ O ₃	4.85	4.47	5.96	11.73	11.09	11.73	12.09	12.07	12.39
MnO	0.09	0.07	0.09	0.05	0.06	0.15	0.17	0.16	0.16
MgO	10.21	10.58	10.22	36.02	35.36	38.58	26.76	27.30	23.97
CaO	16.16	15.26	14.35	0.63	1.11	1.50	7.22	7.62	9.01
Na ₂ O	1.69	1.19	4.72	1.22	4.29	0.24	0.41	1.31	1.74
K ₂ O	0.05	0.05	0.15	0.04	0.15	0.03	0.06	0.09	0.07
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
LOI	0.63	2.03	0.46	13.30	9.43	7.14	7.11	5.58	4.32
TOTAL	100.56	99.38	98.34	100.85	100.22	99.35	99.05	100.23	98.18
Mg [#]	0.81	0.82	0.77	0.86	0.86	0.87	0.81	0.82	0.79
m/f	4.17	4.69	3.40	6.08	6.32	6.52	4.38	4.48	3.83
Li	7.13	5.23	5.78	3.69	20.57	3.37	9.51	7.52	10.02
Be	0.12	0.10	0.14	0.04	0.05	0.08	0.03	0.03	0.07
Sc	26.18	15.80	23.95	7.08	8.11	6.02	20.78	25.73	31.35
V	130.23	86.65	132.80	40.58	54.13	46.20	82.93	87.65	145.21
Cr	226.32	594.91	379.01	2533.29	3925.26	2463.46	1128.05	1227.66	1354.97
Co	45.82	45.63	50.51	150.47	167.96	144.28	110.61	111.78	106.96
Ni	149.08	236.32	160.94	2281.31	2018.62	2418.05	895.85	857.75	888.98
Cu	46.83	153.37	65.90	177.84	53.38	61.23	103.64	103.41	78.60
Zn	23.62	23.02	30.48	53.92	55.50	64.23	57.87	58.03	75.45
Ga	14.30	12.20	13.05	1.91	3.96	3.37	4.49	4.43	5.09
Rb	1.06	2.20	0.92	0.65	0.97	1.41	1.46	1.90	1.60
Sr	347.17	329.70	342.92	9.91	55.46	22.57	117.20	108.76	127.00
Y	6.72	4.25	7.73	1.35	1.60	2.85	3.95	4.22	7.88
Zr	6.68	4.97	10.71	4.80	3.38	10.14	4.13	4.14	9.12
Nb	0.10	0.11	0.10	0.20	0.09	0.30	0.10	0.07	0.13
Mo	0.27	0.06	0.13	3.09	1.48	0.55	0.26	0.17	2.38
Cd	0.07	0.07	0.09	0.06	0.02	0.03	0.08	0.09	0.08
In	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
Cs	0.09	0.19	0.11	0.11	0.12	0.30	0.18	0.15	0.15
Ba	15.35	13.57	11.37	2.89	4.99	8.63	6.91	11.81	11.80

Continued

La	1.05	0.84	0.94	0.38	0.46	0.81	0.39	0.47	1.09
Ce	2.74	2.05	2.82	0.89	1.07	2.11	1.12	1.28	3.09
Pr	0.46	0.31	0.50	0.13	0.15	0.30	0.19	0.23	0.52
Nd	2.48	1.66	2.93	0.57	0.67	1.42	1.11	1.31	2.85
Sm	0.91	0.59	1.06	0.19	0.21	0.44	0.47	0.55	1.07
Eu	0.54	0.43	0.64	0.05	0.14	0.15	0.21	0.24	0.40
Gd	1.24	0.78	1.41	0.19	0.25	0.49	0.68	0.74	1.38
Tb	0.22	0.14	0.27	0.04	0.05	0.08	0.12	0.13	0.25
Dy	1.44	0.88	1.64	0.25	0.30	0.56	0.80	0.86	1.61
Ho	0.29	0.18	0.32	0.05	0.06	0.11	0.15	0.18	0.32
Er	0.78	0.47	0.92	0.16	0.20	0.33	0.45	0.47	0.95
Tm	0.10	0.06	0.12	0.02	0.03	0.05	0.06	0.06	0.12
Yb	0.68	0.41	0.74	0.17	0.23	0.33	0.38	0.41	0.85
Lu	0.09	0.06	0.10	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.11
Hf	0.29	0.20	0.45	0.14	0.11	0.27	0.15	0.19	0.35
Ta	0.02	0.03	0.02	0.04	0.01	0.04	0.03	0.02	0.02
Pb	0.60	1.37	0.52	0.59	0.46	1.23	0.96	0.95	1.20
Bi	0.01	0.11	0.01	0.14	0.05	0.05	0.10	0.09	0.09
Th	0.07	0.08	0.04	0.16	0.06	0.14	0.04	0.09	0.14
U	0.13	0.03	0.03	1.76	0.71	0.21	0.03	0.07	0.10
∑REE	13.02	8.85	14.41	3.11	3.84	7.24	6.18	7.00	14.60
δEu	1.56	1.91	1.59	0.88	1.79	0.96	1.16	1.16	1.00
(La/Yb) _N	1.04	1.41	0.87	1.50	1.36	1.67	0.70	0.78	0.88
(La/Sm) _N	0.72	0.88	0.55	1.25	1.37	1.14	0.52	0.54	0.64
(Gd/Yb) _N	1.47	1.55	1.55	0.88	0.89	1.18	1.44	1.46	1.31

长石牌号在 50~60 之间, 属拉长石, 这一单元的岩石可在镜下发现普遍存在钛铁矿。橄榄辉长岩中可见硫化物颗粒, 橄榄石 Fo 值约为 81, Ni 含量约为 1000×10^{-6} , 单斜辉石主要为透辉石, 偶见有斜方辉石为古铜辉石, 斜长石牌号在 75~85 之间, 属培长石。橄榄岩相包括纯橄岩、含长二辉橄橄榄岩、二辉橄橄榄岩和暗色橄橄榄辉长岩, 纯橄岩中 Fo 值最高, 可达 90 以上, Ni 含量最高 3347.4×10^{-6} ; 其余岩性橄橄榄石 Fo 值也在 80 以上, Ni 含量在 700×10^{-6} ~ 1200×10^{-6} 之间, 单斜辉石主要为透辉石, 斜方辉石主要为古铜辉石, 斜长石牌号在 70~80 之间, 属培长石。

坡北岩体中各岩浆单元的岩石矿物晶体化学特征具有差异(图 8), 可能与岩浆侵入顺序、岩浆分异演化过程不同有关。本次专题填图初步划定岩浆侵入先后顺序为辉长岩相→辉长苏长岩相→橄橄榄辉长岩相→橄橄榄岩相→辉长岩岩枝。

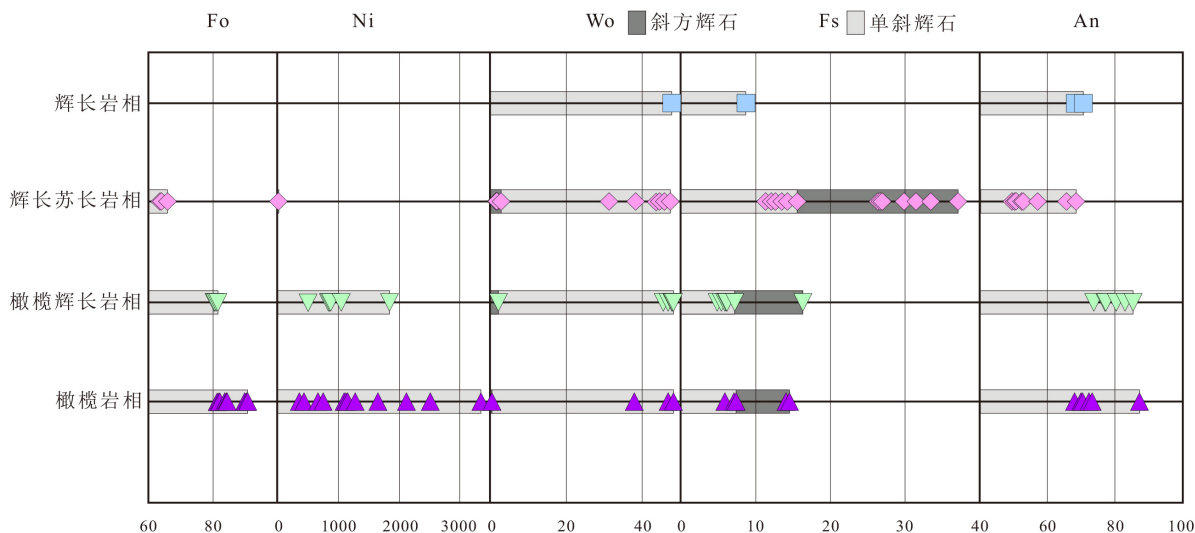


Figure 8. Mineral characteristic map of rocks from the Pobei intrusion

图 8. 坡北岩石矿物特征图

5.2. 原生岩浆

Mg-Fe 在橄榄石 - 熔体之间的分配系数 $K_D = 0.3 \pm 0.03$ [8], 是一个相对稳定的值。在岩浆结晶过程中, 橄榄石是最先结晶的矿物, 由于 Mg 的相容性比 Fe 高, 因此 Mg 会比 Fe 先进入矿物相中, 从而使最先结晶的橄榄石具有最高的 Fo 值, 而随着岩浆结晶分异过程的进行, 随后结晶出的橄榄石 Fo 值会降低。因此, 对于橄榄岩相, 利用 Fo 值最高的橄榄石以及样品的 FeO 含量就可以估算出原生岩浆的 MgO 含量, 公式为 $w(\text{MgO}) = 0.56095K_D \times \text{Fo}/(1 - \text{Fo}) \times w(\text{FeO})$ 。经过初步计算, 橄榄岩相岩石的原生岩浆的 MgO 含量为 18%, 属苦橄质岩浆。

$\text{Mg}^\#$ 值($\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$)是鉴别原生岩浆的重要标志之一, 与地幔橄榄岩平衡的原生岩浆的 $\text{Mg}^\# = 0.65\text{--}0.75$ [13]。初步计算获得辉长岩相岩石原生岩浆 MgO 含量为 8.61%, 而辉长苏长岩相岩石原生岩浆 MgO 含量为 8.74%, 均为普通玄武质岩浆。

5.3. 同化混染

不同的微量元素在不同矿物中具有不同的相容性, 随着结晶作用的进行, 残余岩浆将亏损早期结晶相中的相容元素, 并富集不相容元素, 但是, 总分配系数相近的元素比值并不受分离结晶作用和部分熔融作用的影响, 因此, 可以使用不同元素比值之间的相关变化来判断是否存在同化混染作用。各岩浆单元的岩石在 La/Yb-Ce/Yb 相关图中均表现出明显的正相关性, 说明岩石均经历了同化混染作用。在 Th/Nd-Th/Sm 相关图上, 表现出明显的正相关性, 说明坡北岩体的原生岩浆在演化过程中均经历了壳幔物质的混合作用[14]。Th 与 Nb 之间的正相关性也表明存在陆壳的混染作用(图 9)。

由于硅铝质的地壳物质可以使幔源岩浆的 Si、Al、稀土元素和大离子亲石元素富集, 而造成 Cr、Mg、Ni、V、Ti 和 Fe 的亏损[14]-[21], 而微量元素配分曲线图上 Rb、Ba、Sr、U、Th 等大离子亲石元素的富集以及大部分的 Ti 负异常, 同时 Nb、Ta 等高场强元素的负异常都为同化混染作用的存在提供依据(图 9)。

5.4. 岩浆源区

前人认为坡北岩体的形成与塔里木大火成岩省有关[1] [2] [22] [23] [24], 而岩浆源区均为亏损岩石圈地幔[1] [2] [6] [22] [23] [24], 且经过了俯冲交代的改造[3], 原生岩浆组成的不同是由于岩石圈地幔不同

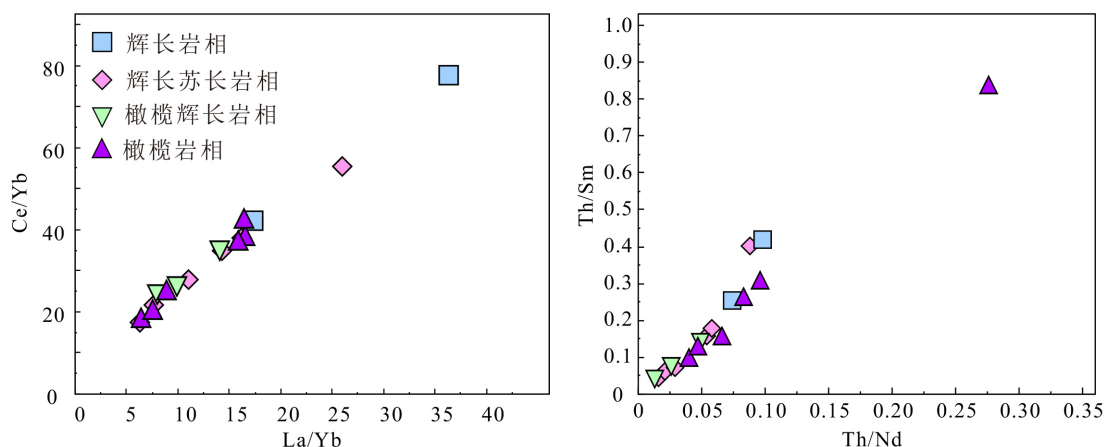


Figure 9. Distinguishing diagram of crust assimilation of the Pobei intrusion
图 9. 坡北岩体地壳混染作用判别图

程度的部分熔融造成的，部分熔融的程度越高，其原生岩浆的 MgO 含量越高，而造成不同程度部分熔融的原因则是由于岩石圈地幔受到位于其下方的地幔柱的高温的影响程度不同。在地幔柱形成的早期，当温度较低时，形成部分熔融程度较低的辉长岩和辉长苏长岩相的原生岩浆。随着时间的推移，当温度逐渐升高时，部分熔融程度随之增大，形成橄榄岩的原生岩浆。[25]得出坡北辉长岩年龄为 276.1 ± 1.9 Ma，橄长岩年龄为 269.9 ± 1.7 Ma，指示坡北岩体各岩相侵入时间相似，可能存在侵入阶段或结晶先后差异。岩浆上侵入过程中受到不同成都的上地壳混染作用。

6. 结论

1) 坡北岩体主要划分为五个岩浆单元，对应五个岩相，分别为辉长岩相、辉长苏长岩相、橄榄辉长岩相、橄榄岩相及辉长岩岩枝。

2) 橄榄岩相的原生岩浆的 MgO 含量为 18%，属苦橄质岩浆，是亏损地幔高度部分熔融的产物。辉长岩相岩石原生岩浆 MgO 含量为 8.61%，辉长苏长岩相岩石原生岩浆 MgO 含量为 8.74%，均为普通玄武质岩浆，是亏损地幔较低的部分熔融的产物。

3) 坡北岩体各单元岩石在形成过程中均受到了不同程度的地壳混染作用，且辉长岩相和辉长苏长岩相受到的混染作用明显高于橄榄岩相和橄榄辉长岩相。

参考文献

- [1] 姜常义, 程松林, 叶书锋, 等. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 115-126.
- [2] 姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 等. 塔里木板块东北部坡 - 镁铁质 - 超镁铁质层状侵入体岩石成因[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2209-2223.
- [3] Xia, M.Z., Jiang, C.Y., Li, C.S. and Xia, Z.D. (2013) Characteristics of a Newly Discovered Ni-Cu Sulfide Deposit Hosted in the Poyi Ultramafic Intrusion, Tarim Craton, NW China. *Economic Geology*, **108**, 1865-1878. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.8.1865>
- [4] Xue, S.C., Li, C.S., Qin, K.Z. and Tang, D.-M. (2016) A Non-Plume Model for the Permian Protracted (266 - 286 Ma) Basaltic Magmatism in the Beishan-Tianshan Region, Xinjiang, Western China. *Lithos*, **256**, 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.04.018>
- [5] 郭娜欣. 塔里木板块东北部坡北岩体内镁铁质层状岩系岩石成因[D]: [硕士学位论文]. 长安: 长安大学, 2012.
- [6] 郭娜欣, 姜常义, 宋艳芳, 等. 塔里木板块东北部坡北岩体内橄榄辉长苏长岩岩石成因[J]. 地质论评, 2012,

58(5): 873-886.

- [7] 焦建刚, 芮会超, 夏明哲, 等. 基性-超基性侵入岩中-大比例尺专题地质填图实践——以塔里木板块东北部坡北岩体为例[J]. 地质通报, 2017, 36(11): 1999-2011.
- [8] Roeder, P.L. and Emslie, R.F. (1970) Olivine-Liquid Equilibrium. *Earth and Environmental Science*, **29**, 275-289. <https://doi.org/10.1007/BF00371276>
- [9] Weaver, S. and Langmuir, C.H. (1990) Calculation of Phase Equilibrium in Mineral-Melt Systems. *Computers & Geosciences*, **16**, 1-19. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(90\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0098-3004(90)90074-4)
- [10] Le Bas, M.J. (1962) The Rock of Aluminium in Igneous Clinopyroxenes with Relation to Their Parentage. *American Journal of Science*, **260**, 267-288. <https://doi.org/10.2475/ajs.260.4.267>
- [11] Kushiro, I. (1960) Si-Al Relation in Clinopyroxenes from Igneous Rocks. *American Journal of Science*, **258**, 518-551. <https://doi.org/10.2475/ajs.258.8.548>
- [12] Sun, S.-S. and McDonough, W. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, **42**, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- [13] 邓晋福. 岩石相平衡与岩石成因[M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1987: 1-198.
- [14] Maier, W.D., Arndt, N.T. and Curl, E.A. (2000) Progressive Crustal Contamination of the Bushveld Complex: Evidence from Nd Isotopic Analysis of the Cumulate Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **140**, 316-327. <https://doi.org/10.1007/s004100000186>
- [15] Wood, D.A. (1980) The Application of a Th-Hf-Ta Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of Basaltic Lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, **50**, 11-30. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90116-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90116-8)
- [16] Marsh, J.S. (1989) Geochemical Constraints on Coupled Assimilation and Fractional Crystallization Involving Upper Crustal Compositions and Continental Tholeiitic Magma. *Earth and Planetary Science Letters*, **92**, 70-80. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90021-6)
- [17] Piccirillo, E.M., Civetta, L., Petrini, R., Longinelli, A., Bellieni, G., CominChiaromonti, P., Marques, L.S. and Melfi, A.J. (1989) Regional Variations within the Parana Flood Basalts (Southern Brazil): Evidence for Subcontinental Mantle Heterogeneity and Crustal Contamination. *Chemical Geology*, **75**, 103-122. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(89\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(89)90023-5)
- [18] Barndon, A.D., HooPer, P.R., Goles, G.G. and Lamber, R.St.J. (1993) Evaluation Crustal Contamination in Continental Basalts: The Istopic Composition of the Picture Gorge Basalt of the Columbia River Basalt Group. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **225**, 452-464. <https://doi.org/10.1007/BF00321750>
- [19] Preston, R.J. and Bell, B.R. (1997) Cognate Gabbroic Xenoliths from a Tholeiitic Subvolcanic Sill Complex: Implications for Fractional Crystallization and Crustal Contamination Processes. *Mineralogical Magazine*, **61**, 329-349. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.406.01>
- [20] Hansen, H. and Nielsen, T.F.D. (1999) Crustal Contamination in Palaeogene East Greenland Flood Basalts: Plumbing System Evolution during Continental Rifting. *Chemical Geology*, **157**, 89-118. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00196-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00196-X)
- [21] Stevenson, R.K., Henry, P. and Garipey, C. (2009) Isotopic and Geochemical Evidence for Differentiation and Crustal Contamination from Granitoids of the Berens River Subprovince, Superior Province, Canada. *Precambrian Research*, **168**, 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.04.011>
- [22] Qin, K., Su, B., Sakyi, P.A., et al. (2011) SIMS Zircon U-Pb Geochronology and Sr-Nd Isotopes of Ni-Cu-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in Correlation with Flood Basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma Mantle PLUME. *American Journal of Science*, **311**, 237-260. <https://doi.org/10.2475/03.2011.03>
- [23] Su, B.X., Qin, K.Z., Sakyi, P.A., Li, X.H., Yang, Y.H., Sun, H., Tang, D.M., Liu, P.P., Xiao, Q.H. and Malaviarachchi, S.P. (2011) U-Pb Ages and Hf-O Isotopes of Zircons from Late Paleozoic Mafic-Ultramafic Units in the Southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic Implications and Evidence for an Early-Permian Mantle Plume. *Gondwana Research*, **20**, 516-531. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.11.015>
- [24] Su, B.X., Qin, K.Z., Tang, D.M., Sakyi, P.A., Chu, Z.Y., Yang, Y.H., Sun, H., Liu, P.P., Xiao, Q.H. and Malaviarachchi, S.P. (2012) Subduction-Induced Mantle Heterogeneity beneath Eastern Tianshan and Beishan: Insights from Nd-Sr-Hf-O Isotopic Mapping of Late Paleozoic Mafic-Ultramafic Complexes. *Lithos*, **135**, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.12.011>
- [25] Xue, S., Qin, K., Li, C., Tang, D., Mao, Y., Qi, L. and Ripley, E.M. (2016) Geochronological, Petrological, and Geochemical Constraints on Ni-Cu Sulfide Mineralization in the Poyi Ultramafic-Troctolitic Intrusion in the Northeast Rim of the Tarim Craton, Western China. *Economic Geology*, **111**, 1465-1484. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.6.1465>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org