

Geochemistry and Geochronology of Mafic Rocks in the Purang Ophiolite, Tibet

Hongkai Chen, Xuping Li, Shuang Chen, Lingquan Zhao

Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong
Email: 825452499@qq.com

Received: Feb. 2nd, 2016; accepted: Feb. 23rd, 2016; published: Feb. 26th, 2016

Copyright © 2016 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

Abstract

The Purang ophiolite is located in the west section of the Yarlung Zangbo suture zone, southwestern of Tibet autonomous region, and on the south side valley of Himalayan mountain. This article focuses on geochemistry and chronological studies of the rocks, which are mainly fine-grained gabbros. The gabbro is fine-grained with a massive texture. The gabbros contain low K₂O and P₂O₅, moderate Al₂O₃, CaO and TiO₂, and high Na₂O contents. Normalized REE patterns are characteristic of high ΣREE, depleted LREE; normalized spider diagrams show enrichment of LILE (Ba, U) and slight depletion of some HFSE (Nb, Ti). In conclusion, gabbros of the Purang ophiolite exhibits N-MORB feature or affiliate to back arc expansive environment. Zircons from Purang gabbros yields well defined weight mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages at 119.4 ± 5.2 Ma and 122.1 ± 7.1 Ma. These ages represent the formation of the ophiolite complexes along the Yarlung Zangbo Suture Zone.

Keywords

Ophiolites, Basic Dikes, N-MORB, Geochemistry, Chronology, Purang, Tibet

西藏普兰蛇绿岩体中基性岩脉的地球化学和年代学特征

陈洪凯, 李旭平, 陈爽, 赵令权

山东科技大学, 山东 青岛
Email: 825452499@qq.com

收稿日期：2016年2月2日；录用日期：2016年2月23日；发布日期：2016年2月26日

摘要

西藏普兰岩体位于雅鲁藏布江缝合带的西段、西藏自治区西南部、喜马拉雅山南侧的峡谷地带。本文对普兰蛇绿岩中的基性岩脉做了详细地球化学和年代学研究，普兰岩体基性岩脉主要是细粒辉长岩。岩石具有中等含量 Al_2O_3 和 CaO ，低 K_2O 、低 P_2O_5 、高 Na_2O 和中等含量 TiO_2 的特征，辉长岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式的轻稀土元素亏损， ΣREE 含量较高，与MOR型环境特征相似。微量元素标准化图解中可以发现微量元素具有Ba、U等LILE元素富集和Nb、Ti等轻微元素亏损的特点，似乎与岛弧有成因联系。综合来看，辉长岩的主量、微量和稀土元素的特征与弧后盆地的N-MORB的地质环境特征相符合。对辉长岩中的锆石进行LA-ICP-MS U-Pb定年测定，获得两组较好的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄数据，得出加权平均年龄为 $119.4 \pm 5.2 Ma \sim 122.1 \pm 7.1 Ma$ ，代表辉长岩形成的年龄，也是普兰蛇绿岩形成的年龄。

关键词

蛇绿岩，基性岩脉，N-MORB，地球化学，年代学，西藏普兰

1. 引言

雅鲁藏布江缝合带是我国境内最大的蛇绿岩带，呈近东西向断续延伸近 2000 km，它位于有着“世界屋脊”著称的青藏高原的南部与西南部，代表着在晚侏罗纪 - 白垩纪期间的欧亚板块与印度板块汇聚之后，新特提斯大洋洋壳和岩石圈的残余[1]。由于印度板块与欧亚板块的俯冲 - 碰撞以及特提斯洋的最终闭合而形成雅鲁藏布江缝合带[2]。雅鲁藏布江缝合带近东西走向的贯穿西藏南部地区，导致不同地区的缝合带的表现出的特征也不尽相同[3]。普兰位于雅江带的西段，其境内形成的蛇绿岩体有着不同的特征，普兰蛇绿岩体对雅江带的环境形成有着重要帮助，因此，近年来国内外学者对雅江带蛇绿岩带作了大量的研究，本文主要在此基础上对蛇绿岩中的基性岩脉进行分析研究。

二十世纪七十年代，蛇绿岩可以根据对造山带蛇绿岩的研究分为四个单元，从下到上可以依次分为：变质橄榄岩、深成杂岩（包括辉长岩和每铁 - 超镁铁质堆晶岩）、席状岩墙群杂岩和喷出岩[4]。也有人认为蛇绿岩是构造侵位于大陆边缘造山带的古洋壳和上地幔的残片[5]。最近几年，有大量的地质学家对西藏雅江带的蛇绿岩带成因产生浓厚的兴趣，并做了一定的研究，但由于受到自然环境的影响，研究地带主要集中于中、东部地区，对于西部的大部分蛇绿岩块还未进行研究或研究程度不深[6] [7]。而本次就是对西藏雅江带西部普兰地区的蛇绿岩带进行研究，研究的主要内容就是蛇绿岩带中的基性岩脉。蛇绿岩深成杂岩的主要组成之一就是辉长岩，侵入于地幔橄榄岩中的辉长岩与典型蛇绿岩剖面中深成杂岩单元明显不同[26]，普遍认为这类基性分凝体为地幔橄榄岩的同源熔出物[8]，属于以岩墙或岩脉形成抽出而固结的地幔橄榄岩的同源产物。由于岩石在不同环境中形成的矿物特征不同，所以根据岩石的矿物特征与地球化学特征可以来推断岩石的成因以及形成背景。由于先前已经有学者对普兰岩体做过一定的研究，所以本文着重对西藏西段普兰蛇绿岩体中的基性岩脉辉长岩进行锆石年代、岩石、矿物及地球化学的特征分析，并通过与前人所得出的结论进行对比，探讨其地质意义以及所经历的构造环境。

2. 区域地质背景

雅鲁藏布江缝合带产出的蛇绿岩块体存在一些规模较大的，因此按照地域的划分可以分为三部分，分别为：曲水至墨脱为东段；昂仁至仁布为中段；萨嘎以西至中印边境为西段。其中西段又可以进一步

划分为达巴至休古嘎布蛇绿岩带的南亚带和达机翁至萨嘎蛇绿岩带的北亚带两个地带[9]。本次所研究的普兰蛇绿岩带便位于南亚带的中段，同时也是雅鲁藏布江缝合带西段的面积高达 600 km² 的最大蛇绿岩体，东西延伸约 60 km，南北宽约 20 km (图 1)。

普兰拉昂错蛇绿岩体呈 NWW 方向展布，大致可分为 4 个岩相带，从北至南分别是① 混杂岩带，沿岩体北部边缘分布，由蛇纹岩、强蛇纹石化方辉橄榄岩与上侏罗统碎屑岩岩块构造混杂而成；② 纯橄榄岩相，主体为纯橄榄岩，含少量方辉橄榄岩；③ 方辉橄榄岩相，是岩体的主体，约占总面积的 70%，以不同程度蛇纹石化的方辉橄榄岩为主，含少量纯橄榄岩透镜体，两者呈渐变或突变接触；④ 方辉橄榄岩+辉绿岩脉相，主要为蛇纹石化方辉橄榄岩，极少量二辉橄榄岩，并有一些辉绿岩脉侵入[10]。本文所采样品主要位于拉昂错岩体的南侧的方辉橄榄岩岩体，主要对方辉橄榄岩岩体中的基性岩脉，基性岩脉主要为辉长岩、辉绿岩，脉体宽度大小不一，数厘米到数米均有，部分发育有冷凝边。

3. 岩石学及矿物学特征

本文所采的辉长岩主要位于拉昂错岩体南部的方辉橄榄岩中，岩石比较新鲜，局部有绿泥石化。辉长岩主要为细粒辉长结构，少部分为辉绿结构，辉石长石含量基本各半。显微镜下辉石主要为灰色或棕褐色，半自形-自形发育，呈板状、片状，有些裂理发育，粒度大小不一，主要集中在 0.5~2 mm；长石无色，较自形，双晶发育，粒度 0.25~1.5 mm，呈片状分布。

辉长岩的主要矿物有单斜辉石，含量 25%~30%，少量的斜方辉石，含量<5%；橄榄石粒状为镁铁橄榄石，含量 10%~15%；长石主要为钠长石和钙长石，可见聚晶双晶；副矿物主要为钛铁矿。有些蚀变的辉长岩有方解石脉体、长英质脉体充填其中，有的辉石长石边缘和表面发生蚀变，有些薄片可见沿裂隙发生绿泥石化(图 2)。

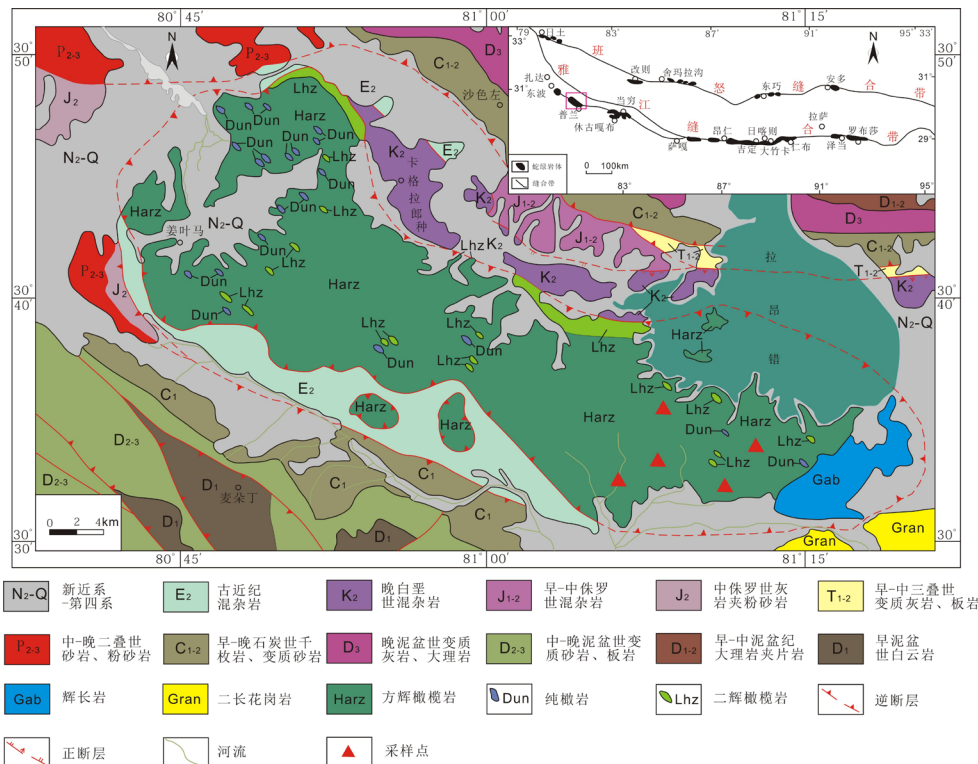


Figure 1. Geological sketch map of the Purang ophiolite in the west Yarlung Zangbo Suture Zone
图 1. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰岩体地质简图(据徐向珍等, 2011; 河北省地质调查院, 2005 修改)



Figure 2. The microscope photos of gabbros in the Purang ophiolite; (a) gabbro texture; (b) chloritization of clinopyroxenes; (c) serious alteration pyroxene; (d) chloritization of clinopyroxenes [23]

图 2. 普兰岩体中辉长岩的显微镜下照片; (a) 辉长结构; (b) 绿泥石化的单斜辉石; (c) 蚀变严重的辉石; (d) 绿泥石化的单斜辉石。Pl——斜长石; Cpx——单斜辉石; Ol——橄榄石; Chl——绿泥石; ilm——钛铁矿; 矿物代号据 Kretz [23]

4. 地球化学特征

我们选取了 9 件辉长岩的样品, 全部产自西藏普兰地区拉昂错岩体南部。主要氧化物的测定采用 XP-X 射线荧光光谱仪(XRF)——玻璃珠熔融, 微量元素通过在北京大学用 Agilent (安捷伦科技公司) 7500 cs 电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析得到, 铁的总含量是根据 Fe_2O_3 重量百分比确定的, 其主要氧化物的精度 $<1\%$, 微量元素精度的是 $1\% \sim 3\%$ 。主微量元素的分析结果列在表 1 中。

由表 1 可知, 辉长岩中 SiO_2 含量 $44.51\% \sim 51.24\%$, 平均含量 48.20% ; MgO 含量 $7.10\% \sim 9.05\%$, 平均含量 7.98% , 说明辉长岩的成分变化不大, 比 N-MORB 的值略低; Al_2O_3 的含量 $13.52\% \sim 16.37\%$, 平均含量 15.11% ; CaO 的含量 $8.53\% \sim 10.48\%$, 平均含量 9.40% ; 岩石中具有中等的 TiO_2 , 含量 $1.03\% \sim 1.54\%$, 平均含量 1.38% , 与世界辉长岩的化学成分相近; K_2O 的含量 $0.08\% \sim 0.18\%$, 平均含量 0.14% , 与岛弧拉斑玄武岩中的含量相仿; P_2O_5 的含量 $0.16\% \sim 0.26\%$, 平均含量 0.22% , TiO_2 和 Al_2O_3 的含量与 N-MORB (1.15% 、 15.9%)十分接近, 而 P_2O_5 的含量略高于 N-MORB(0.09%), 属于典型的大洋玄武岩[11], 与板内玄武岩明显不同。岩石中的 Na_2O 的含量 $2.76\% \sim 4.59\%$, 平均含量 3.86% ; LOI 的含量 $0.52\% \sim 9.18\%$, 平均含量 2.86% , 两者含量均较高, 表明岩石经历了不同程度的蚀变作用。

辉长岩的稀土元素含量不高, 且总量变化不大, $\Sigma\text{REE} = 33.34 \times 10^{-6} \sim 51.78 \times 10^{-6}$, 平均值为 44.59×10^{-6} , 与 Sun&McDonough (1989) [11]给出的 N-MORB (39.11×10^{-6})和 E-MORB (49.09×10^{-6})的值相差不大, 但与 OIB (198.96×10^{-6})则明显差距很大。LREE/HREE = $1.23 \sim 1.39$, La/Yb 的值 $0.60 \sim 0.82$, 呈轻稀土元素(LREE)亏损的近水平型配分模式, 表明岩浆的结晶分异作用较弱。在球粒陨石标准化配分曲线图上, 辉长岩样品均表现为轻稀土元素轻微亏损型配分曲线特征, 与 N-MORB 的轻稀土配分曲线相似(图 3)。

Table 1. Major (%) and trace ($\times 10^{-6}$) element compositions of the gabbros from the Purang ophiolite
表 1. 普兰岩体中辉长岩的主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)成份

样品号	11PL003-1	11PL008	11PL013	11PL016	11PL079	11PL103	11PL111	11PL112	11PL122
SiO ₂	44.51	49.44	49.22	51.24	48.57	44.75	48.25	50.06	47.78
TiO ₂	1.27	1.43	1.39	1.26	1.03	1.51	1.53	1.54	1.42
Al ₂ O ₃	14.47	15.94	15.29	14.71	14.45	16.37	16.34	14.89	13.52
TFe ₂ O ₃	9.88	10.76	11.00	10.62	10.45	12.15	10.43	11.79	10.44
MnO	0.15	0.17	0.17	0.16	0.17	0.19	0.16	0.18	0.17
MgO	8.81	7.69	8.53	7.54	8.38	7.10	7.51	7.13	9.05
CaO	8.53	9.81	9.44	9.59	9.95	10.48	9.02	8.80	8.96
Na ₂ O	3.02	3.98	3.96	3.97	3.97	2.76	4.59	4.35	4.13
K ₂ O	0.12	0.12	0.09	0.14	0.28	0.08	0.18	0.14	0.09
P ₂ O ₅	0.18	0.23	0.20	0.20	0.16	0.25	0.25	0.26	0.21
LOI	9.18	0.52	0.72	0.62	2.61	4.56	2.14	0.95	4.48
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04
NiO	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
CoO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
V ₂ O ₅	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06
Total	99.82	99.77	99.76	99.82	99.85	99.80	99.81	99.77	99.82
Li	6.30	5.14	5.07	1.70	4.66	4.59	4.45	4.36	2.08
Be	0.35	0.40	0.38	0.39	0.29	0.42	0.42	0.43	0.35
P	397.41	494.46	441.33	444.50	356.70	539.74	551.39	559.15	458.47
Sc	38.98	40.09	41.93	40.06	39.66	40.61	40.74	40.83	44.08
Ti	7636.59	8593.88	8327.91	7560.90	6168.88	9040.62	9155.49	9232.08	8532.43
V	255.93	286.21	282.69	274.54	255.16	300.34	303.97	306.40	313.88
Cr	187.92	176.58	261.41	192.40	161.12	171.30	169.94	169.03	102.21
Mn	1281.83	1390.37	1409.83	1308.46	1260.06	1441.02	1454.05	1462.73	1459.29
Co	40.34	40.69	42.82	38.71	36.34	40.86	40.90	40.93	41.47
Cu	72.41	65.26	74.13	59.53	14.57	61.93	61.07	60.50	58.33
Ga	15.07	16.36	16.47	15.82	14.85	16.97	17.12	17.22	11.59
Rb	0.75	0.67	0.21	0.58	3.57	0.63	0.62	0.61	0.35
Sr	235.30	224.01	177.01	195.94	146.69	218.73	217.38	216.47	201.53
Y	26.93	31.33	29.85	26.98	23.21	33.39	33.92	34.27	29.84
Zr	77.99	84.66	88.05	77.74	65.10	87.77	88.58	89.11	54.47
Nb	3.47	2.31	1.46	1.55	1.07	1.76	1.63	1.53	1.35
Sn	0.76	0.90	1.02	0.71	0.61	0.97	0.99	1.00	0.79
Cs	0.21	0.10	0.06	≤0.01	0.02	0.05	0.04	0.03	0.03
Ba	26.73	17.06	22.33	36.94	37.61	12.54	11.38	10.61	15.90
La	2.32	2.71	2.48	2.37	1.88	2.90	2.94	2.97	1.95
Ce	7.92	9.25	8.55	7.94	6.20	9.87	10.03	10.13	7.40
Pr	1.40	1.67	1.53	1.40	1.13	1.79	1.82	1.84	1.42
Nd	8.00	9.41	8.74	7.97	6.39	10.06	10.23	10.35	8.44
Sm	2.75	3.21	2.99	2.72	2.22	3.42	3.48	3.52	2.96
Eu	1.06	1.21	1.17	1.06	0.97	1.28	1.30	1.31	1.10
Gd	3.85	4.49	4.23	3.80	3.19	4.79	4.87	4.92	4.21
Tb	0.70	0.81	0.78	0.70	0.59	0.86	0.88	0.89	0.77
Dy	4.66	5.43	5.17	4.62	3.97	5.80	5.89	5.95	5.18
Ho	1.03	1.19	1.13	1.02	0.88	1.26	1.28	1.29	1.12
Er	3.00	3.49	3.33	3.01	2.60	3.72	3.78	3.82	3.36
Tm	0.45	0.52	0.50	0.45	0.39	0.56	0.57	0.57	0.51
Yb	2.90	3.35	3.22	2.91	2.54	3.57	3.62	3.66	3.24
Lu	0.44	0.51	0.49	0.44	0.39	0.54	0.55	0.55	0.49
Hf	2.50	2.71	2.64	2.34	2.01	2.81	2.84	2.86	2.03
Ta	0.45	0.37	0.26	0.37	0.56	0.32	0.31	0.31	0.34
Tl	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
208 Pb	5.28	4.70	2.26	2.96	4.80	4.42	4.35	4.30	6.29
232 Th	0.14	0.12	0.09	0.11	0.09	0.11	0.10	0.10	0.05
238 U	0.14	0.15	0.07	0.11	0.10	0.15	0.15	0.15	0.08

在原始地幔标准化蛛网图上(图 4), 辉长岩的微量元素显示出 Ba、U 元素富集, Rb、Th 与 Nb 亏损。Rb、Ba、Th、Nb 变化较大, 其它 LILE 元素变化范围较小, 表现平缓, 由此表明辉长岩基本没有受到后期流体的影响, 辉长岩的微量元素特征能够反映其原始的形成条件和构造环境。普兰辉长岩的微量元素

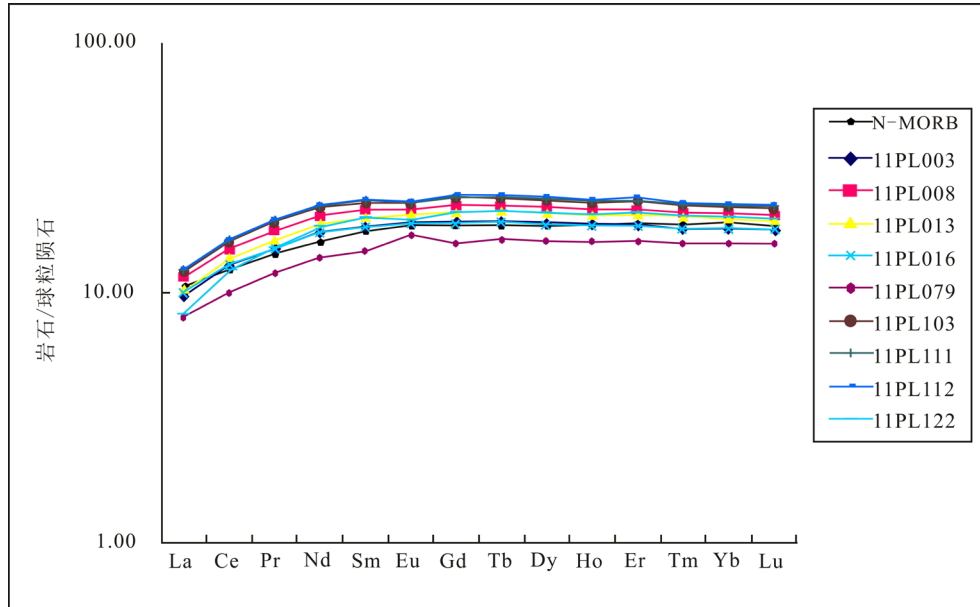


Figure 3. Chondrite normalized REE patterns of gabbros from Purang ophiolite (Standard data from McDonough & Sun, 1995) [31]

图 3. 普兰辉长岩稀土元素分配样式(标准化球粒陨石数据引自 McDonough & Sun, 1995) [31]

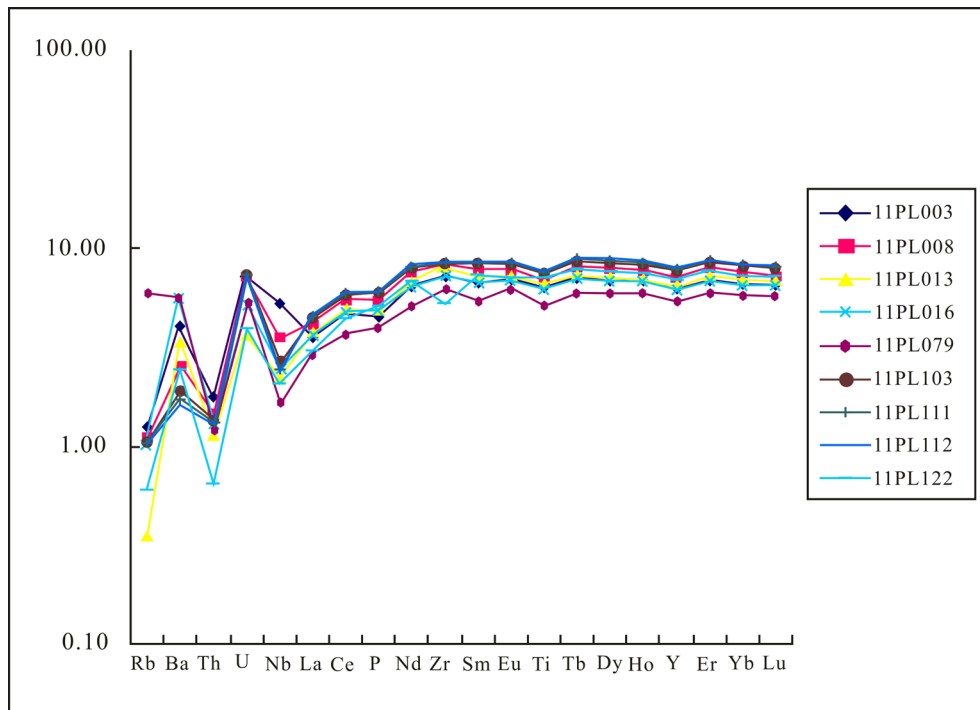


Figure 4. Primitive mantle normalized spider diagram of trace elements of the gabbros from Purang ophiolite (Standard data from McDonough & Sun, 1995)

图 4. 普兰辉长岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化数据引自 McDonough & Sun, 1995)

分布也表现出与 N-MORB 相似的特征。

根据已有辉长岩的主量元素数据,我们将其中的挥发分去掉以后,重新计算到 100%,将得到的 Na_2O 、 K_2O 和 SiO_2 的数据投到硅碱图中,根据 MacDonal (1968) [29]的分界线判断出辉长岩为碱性系列,其中一个样品点落到碱性亚碱性的分界线上,两个样品点落到亚碱性系列中。高场强元素 Zr、Hf、Nb、Ta 在蚀变和变质作用过程中具有良好的稳定性,是岩石成因和源区性质的良好示踪剂[12],因此可以通过用 Hf、Th、Ta、Nb 的含量以及变化来判别岩石的形成环境。考虑到蚀变作用的影响,采用不活泼元素(Zr、Ti、Nb、Y)来判别岩石的类型,本文采用了 $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}_2 * 0.0001$ 的图解,也判断出辉长岩为碱性系列(图 5)。

5. 年代学特征

测年所取锆石样品均来自细粒辉长岩。由图 6 可以看出,锆石为自形到半自形晶形,颜色为灰白色,颗粒较小,裂隙少,较均一,长宽比大约 1:1.5~1:2,长轴长度约为 70~150 μm ,多为短柱状,柱面较发育,多数颗粒呈现无环带、弱环带,基本不含矿物包裹体。样品把的制备与锆石的阴极发光(CL)图像的采集在西北大学完成,锆石的 U-Pb 同位素定年测试在西北大学大陆动力国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准程序进行,激光束斑为 30 μm ,详细的实验过程与仪器原理见参考文献[13]。

通过对辉长岩中锆石的样品数据分析(表 2),辉长岩中 Th 的含量为 15.43×10^{-6} ~ 136.22×10^{-6} ,且仅有一组数据大于 100,说明 Th 的含量很低;U 的含量为 39.78×10^{-6} ~ 158.01×10^{-6} ,含量变化不大,锆石的 Th/U 比值约为 0.33~0.86,表明它们均为岩浆锆石。由于岩浆锆石年龄较小(<1000 Ma),采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 的测年数据。测点显示的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄范围为 104.1~133.5 Ma,在置信度 95%的条件下, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 的年龄为 $119.4 \pm 5.2 \text{ Ma}$ ~ $122.1 \pm 7.1 \text{ Ma}$,代表了辉长岩样品的形成年龄(图 7)。

6. 讨论

Penrose 将蛇绿岩定义为一套由变质组构的超镁铁岩(包括方辉橄榄岩、二辉橄榄岩和纯橄岩)、辉长岩(多具堆晶结构,并与堆晶橄榄岩和辉石岩伴生)、镁铁质席状岩墙和镁铁质火山岩(通常为枕状玄武岩)组成的岩石[14],辉长岩是蛇绿岩重要的组成之一。因此与辉长岩的地球化学和年代学研究对研究蛇绿岩

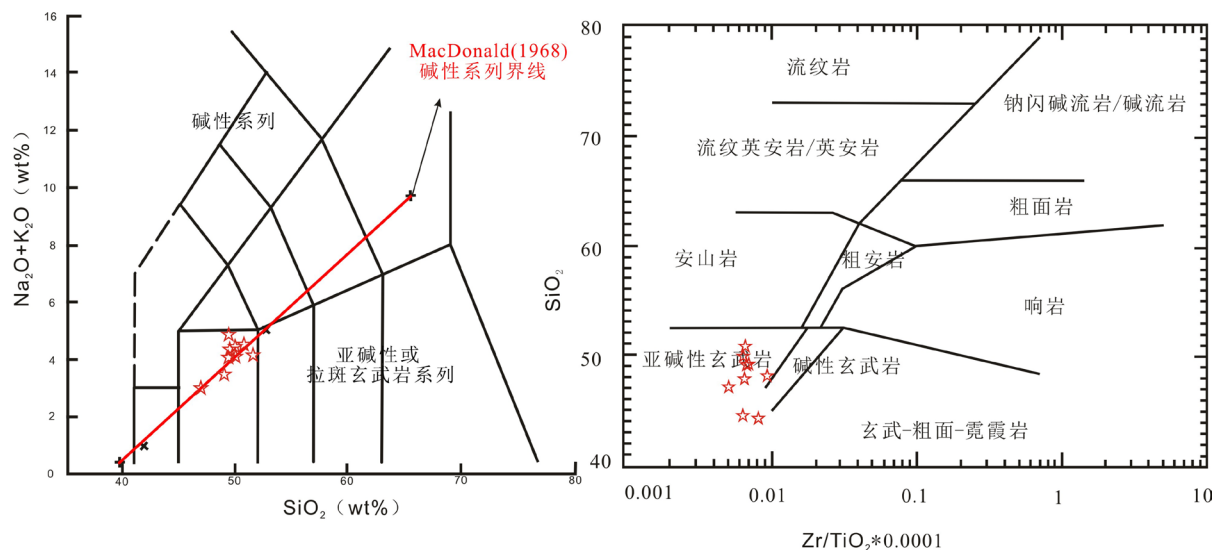


Figure 5. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}\text{-SiO}_2$ and $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}$ diagrams of the gabbros from Purang ophiolite

图 5. 普兰岩体中辉长岩的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}\text{-SiO}_2$ 和 $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}$ 图解

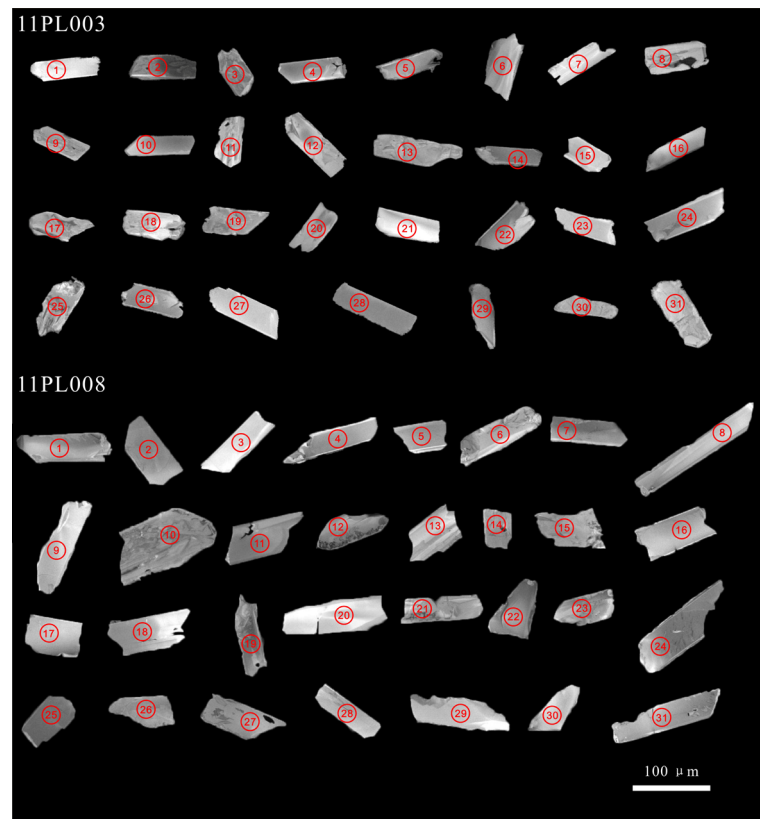


Figure 6. CL images of zircons from the gabbros of Purang complex
图 6. 普兰岩体中辉长岩中锆石的阴极发光图像

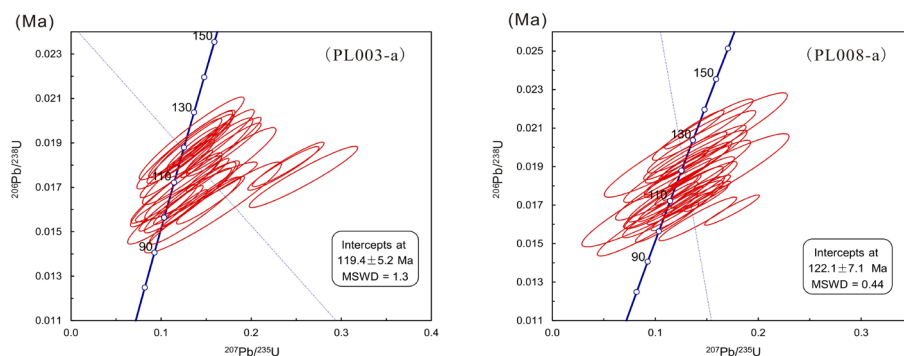


Figure 7. LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagrams of the gabbros from the Purang ophiolite
图 7. 普兰岩体中辉长岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和图

的成因有着重要的意义。

通过对辉长岩主量元素与微量元素的处理, 可以发现, 在图 8 的 a、b、c 的判别图解中, 投点均落于洋中脊玄武岩(MORB)区域; 而在 c 图中, 岩石样品绝大部分落于洋中脊玄武岩(MORB)区域, 同时大部分还落于洋内弧玄武岩(IOAB)区域和弧后玄武岩(BABB)区域。因此, 普兰辉长岩可能形成于洋中脊环境或弧后盆地的扩张环境。

本区辉长岩的 Hf 的丰度变化在 $2.01 \times 10^{-6} \sim 2.86 \times 10^{-6}$, 与 N-MORB(2.05×10^{-6}) [11] 相差很小; Zr 的丰度变化在 $54.47 \times 10^{-6} \sim 89.11 \times 10^{-6}$, 与典型 N-MORB (74×10^{-6}) 的值相近[11], 明显低于 OIB (280×10^{-6}); Nb 的丰度为 $1.07 \times 10^{-6} \sim 3.47 \times 10^{-6}$ 与标准的 N-MORB 的值 2.33×10^{-6} 相当, 明显区别于亏损 Nb

Table 2. LA-ICP-MS U-Pb zircon data from the gabbros of Purang complex
表 2. 普兰岩体中辉长岩的 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

测点	Th($\times 10^{-6}$)	U($\times 10^{-6}$)	Th/U	206Pb/238U	% err	207Pb/235U	% err	207Pb/206Pb	% err	206Pb/238U Age(Ma)	$\pm 1\sigma$	207Pb/235U Age(Ma)	$\pm 1\sigma$	207Pb/206Pb Age(Ma)	$\pm 1\sigma$
PL008D05	58.87	112.56	0.52301	0.01884	0.00095	0.13202	0.02801	0.05083	0.01110	120.3	6	125.9	25.13	233.1	438.53
PL008D06	23.89	59.71	0.40010	0.02092	0.00105	0.14613	0.03232	0.05065	0.01150	133.5	6.64	138.5	28.63	225.1	454.22
PL008D07	61.9	100.75	0.61439	0.01777	0.00194	0.12936	0.06643	0.05279	0.02764	113.6	12.27	123.5	59.73	319.7	887.95
PL008D08	44.77	83.9	0.53361	0.01869	0.00049	0.13365	0.01358	0.05186	0.00554	119.4	3.07	127.4	12.16	279.2	227.35
PL008D09	15.43	41.35	0.37316	0.02012	0.00179	0.13942	0.05872	0.05024	0.02158	128.4	11.34	132.5	52.33	206.1	774.73
PL008D11	25.38	59.98	0.42314	0.01964	0.00099	0.13931	0.03231	0.05144	0.01222	125.4	6.26	132.4	28.79	260.8	469.77
PL008D15	69.92	109.23	0.64012	0.01667	0.00066	0.12588	0.01966	0.05477	0.00888	106.6	4.18	120.4	17.73	402.8	327.07
PL008D16	48.37	92.61	0.52230	0.01913	0.00046	0.12877	0.01469	0.04882	0.00578	122.2	2.9	123	13.21	139	256.8
PL008D20	81.77	127.28	0.64244	0.01750	0.00070	0.13988	0.02189	0.05796	0.00942	111.9	4.44	132.9	19.5	528.1	321.52
PL008D21	18.86	50.41	0.37413	0.01740	0.00106	0.11766	0.03203	0.04904	0.01368	111.2	6.75	112.9	29.1	149.6	549.11
PL008D22	40.93	87.05	0.47019	0.01628	0.00075	0.14133	0.02495	0.06297	0.01153	104.1	4.78	134.2	22.19	707.2	347.56
PL008D23	57.79	97.23	0.59436	0.01778	0.00052	0.12208	0.01487	0.04980	0.00632	113.6	3.27	117	13.46	185.5	271
PL008D25	35.41	81.49	0.43453	0.01674	0.00052	0.17463	0.01759	0.07566	0.00812	107	3.29	163.4	15.21	1086.2	201.15
PL008D27	18.63	55.27	0.33707	0.01829	0.00137	0.12708	0.04338	0.05041	0.01759	116.8	8.7	121.5	39.08	213.7	654.71
PL008D28	41.28	76.22	0.54159	0.02092	0.00066	0.13807	0.01905	0.04786	0.00684	133.5	4.15	131.3	17	91.4	308.67
PL008D29	49.43	100.08	0.49390	0.01740	0.00055	0.14439	0.01914	0.06019	0.00829	111.2	3.48	136.9	16.98	610.4	272.63
PL008D30	136.22	158.01	0.86210	0.01788	0.00042	0.12464	0.01124	0.05056	0.00483	114.2	2.66	119.3	10.15	220.7	207.09
PL008D31	30.76	70.85	0.43416	0.01782	0.00112	0.12516	0.03427	0.05095	0.01431	113.8	7.1	119.7	30.92	238.6	544.08
PL008D32	45.63	85.92	0.53108	0.01734	0.00045	0.14947	0.01395	0.06253	0.00620	110.8	2.85	141.4	12.32	692.4	198.37
PL008D36	23.46	55.86	0.41998	0.01956	0.00082	0.12918	0.02677	0.04789	0.01015	124.9	5.17	123.4	24.07	92.7	438.16
PL008D37	29.08	77.23	0.37654	0.01689	0.00105	0.11773	0.03265	0.05054	0.01436	108	6.64	113	29.66	219.9	551.21
PL008D38	55.8	100.73	0.55396	0.01751	0.00115	0.12496	0.03608	0.05176	0.01532	111.9	7.31	119.6	32.56	274.9	565.4
PL008D39	65.04	82.5	0.78836	0.01901	0.00124	0.12928	0.03956	0.04932	0.01542	121.4	7.82	123.5	35.57	163.3	602.76
PL008D43	19.86	51.64	0.38459	0.01631	0.00129	0.10491	0.04035	0.04664	0.01829	104.3	8.21	101.3	37.08	30.6	741.55
PL008D45	16.2	39.78	0.40724	0.02029	0.00107	0.14511	0.03476	0.05186	0.01273	129.5	6.78	137.6	30.82	279.3	481.8
PL008D46	22.79	53.82	0.42345	0.01880	0.00084	0.13039	0.02709	0.05030	0.01072	120.1	5.32	124.5	24.34	208.8	430.99
PL008D47	27.96	65.67	0.42577	0.01681	0.00054	0.11676	0.01634	0.05036	0.00730	107.5	3.39	112.1	14.86	211.5	304.9
PL008D52	93.86	119.39	0.78616	0.01610	0.00068	0.11158	0.02039	0.05026	0.00947	102.9	4.3	107.4	18.63	207.1	386.72
PL008D53	66.08	107.69	0.61361	0.01742	0.00039	0.13075	0.01033	0.05441	0.00462	111.4	2.45	124.8	9.27	388.2	180.24
PL008D54	32.99	89.86	0.36713	0.01717	0.00068	0.11238	0.01909	0.04746	0.00832	109.7	4.28	108.1	17.42	72	371.5
PL008D55	39.51	77.33	0.51093	0.01914	0.00057	0.12818	0.01625	0.04856	0.00640	122.2	3.61	122.5	14.62	126.4	283.97
PL003D61	43.09	82.19	0.52427	0.01884	0.00083	0.13014	0.02465	0.05008	0.00977	120.3	5.27	124.2	22.15	198.9	399.52
PL003D65	101.88	150.29	0.67789	0.01889	0.00083	0.16906	0.02771	0.06491	0.01106	120.6	5.24	158.6	24.07	771.5	322.91
PL003D69	27.51	55.42	0.49639	0.01803	0.00066	0.24115	0.02631	0.09698	0.01131	115.2	4.17	219.4	21.52	1566.8	203.93

续表

PL003D70	25.28	60.79	0.41586	0.01629	0.00122	0.12307	0.03975	0.05479	0.01814	104.2	7.71	117.9	35.94	403.6	608.4
PL003D71	71.37	98.87	0.72186	0.01875	0.00062	0.13466	0.01857	0.05209	0.00746	119.7	3.89	128.3	16.62	289.6	297.8
PL003D72	40.2	83.62	0.48075	0.01873	0.00103	0.13250	0.03173	0.05130	0.01261	119.6	6.5	126.3	28.44	254.2	484.32
PL003D73	41.71	69.54	0.59980	0.01785	0.00065	0.23581	0.02615	0.09579	0.01133	114.1	4.11	215	21.49	1543.7	207.31
PL003D77	62.48	97.78	0.63899	0.01595	0.00100	0.13767	0.03352	0.06259	0.01574	102	6.35	131	29.92	694.2	460.88
PL003D78	86.96	140.73	0.61792	0.01850	0.00059	0.13217	0.01683	0.05182	0.00688	118.1	3.72	126	15.09	277.5	278.55
PL003D79	17.82	47.66	0.37390	0.01785	0.00087	0.11799	0.02725	0.04794	0.01133	114	5.49	113.3	24.75	95.2	481.99
PL003D81	39.28	83.63	0.46969	0.01893	0.00099	0.13288	0.03083	0.05091	0.01212	120.9	6.26	126.7	27.63	236.7	472.47
PL003D82	48.36	85.17	0.56781	0.01761	0.00137	0.15482	0.04814	0.06376	0.02040	112.5	8.69	146.2	42.33	733.6	562.54
PL003D84	50.24	89.26	0.56285	0.01756	0.00049	0.15171	0.01565	0.06263	0.00682	112.2	3.11	143.4	13.79	695.9	216.56
PL003D85	53	98.81	0.53638	0.01607	0.00069	0.10770	0.02129	0.04859	0.00987	102.8	4.41	103.9	19.52	128.2	418.96
PL003D86	43.25	87.08	0.49667	0.01642	0.00071	0.15483	0.02491	0.06838	0.01145	105	4.49	146.2	21.9	880.1	312.76
PL003D87	24.15	58.37	0.41374	0.01747	0.00091	0.25814	0.03981	0.10717	0.01750	111.6	5.76	233.2	32.13	1751.9	272.23
PL003D88	37.17	74.96	0.49586	0.01690	0.00100	0.11679	0.03326	0.05011	0.01458	108	6.32	112.2	30.24	200.1	564.17
PL003D89	27.89	60.18	0.46344	0.01870	0.00079	0.16970	0.02733	0.06579	0.01101	119.5	4.97	159.2	23.73	799.6	316.25
PL003D93	36.02	72.7	0.49546	0.01914	0.00048	0.15452	0.01461	0.05853	0.00587	122.2	3.06	145.9	12.85	549.7	205.04
PL003D94	23.16	78.27	0.29590	0.01870	0.00117	0.12766	0.03602	0.04950	0.01431	119.4	7.43	122	32.44	171.8	563.58
PL003D95	93.49	130.53	0.71623	0.01805	0.00041	0.13957	0.01161	0.05605	0.00499	115.3	2.6	132.7	10.35	454	186.78
PL003D97	56.04	87.04	0.64384	0.01897	0.00101	0.15482	0.03215	0.05916	0.01270	121.2	6.39	146.2	28.27	573.1	408.9
PL003D10 ₀	147.51	169.49	0.87032	0.01606	0.00055	0.12600	0.01682	0.05685	0.00792	102.7	3.52	120.5	15.17	485	281.74
PL003D10 ₁	29.55	61.15	0.48324	0.01620	0.00058	0.11925	0.01818	0.05336	0.00842	103.6	3.67	114.4	16.49	344	322.34
PL003D10 ₂	17.39	57.87	0.30050	0.01673	0.00075	0.13936	0.02563	0.06039	0.01147	106.9	4.75	132.5	22.84	617.5	364.49
PL003D10 ₄	17.41	41.19	0.42268	0.01609	0.00135	0.15768	0.05017	0.07103	0.02332	102.9	8.56	148.7	44	958.3	556.87
PL003D10 ₅	23.74	45.51	0.52164	0.01679	0.00089	0.13924	0.04464	0.06012	0.01955	107.3	5.65	132.4	39.79	607.8	580.91
PL003D10 ₉	51.98	98.48	0.52782	0.01657	0.00107	0.13422	0.03489	0.05873	0.01572	105.9	6.76	127.9	31.24	557.3	496.27
PL003D11 ₀	51.35	89.31	0.57496	0.01689	0.00110	0.11700	0.03371	0.05023	0.01483	107.9	6.96	112.3	30.64	205.8	570.56
PL003D11 ₁	34.19	75.64	0.45201	0.01817	0.00129	0.14071	0.04050	0.05613	0.01662	116.1	8.19	133.7	36.05	457.3	549.74
PL003D11 ₂	34.97	71.5	0.48909	0.01920	0.00123	0.13404	0.03848	0.05062	0.01488	122.6	7.77	127.7	34.46	223.6	566.84

的岛弧玄武岩的标准 48.0×10^{-6} 和 E-MORB 的标准 8.30×10^{-6} [11]; Ta 的丰度为 $0.26 \times 10^{-6} \sim 0.56 \times 10^{-6}$, 与 N-MORB 的值 0.132×10^{-6} 略有区别[11], 与亏损 Ta 的岛弧玄武岩 2.70×10^{-6} 相差很大, 但是与 E-MORB 的标准 0.47×10^{-6} 相近[11]。普兰地区的辉长岩中的 Zr/Nb 的值为 22.51~61.01, Nb/La 的值为 0.52~1.50, 但是只有一组 Nb/La 的值为 1.50, 其余相差不大, Hf/Ta = 3.60~10.32; 由数据中可以得出, N-MORB 的 Zr/Nb 值为多大于 30, 仅有一组数据为 22.51, 而 E-MORB 的标准约为 10, 因此相差很大。而 N-MORB 的标准值约为 Nb/La < 1、Hf/Ta > 5 [15], 普兰辉长岩中的 Nb/La 的值只有一组大于 1, Hf/Ta 的值仅有一组为 3.60, 其余均大于 5。因此, 普兰辉长岩的高场强元素丰度特征显示其为 MORB 型岩石, 明显区别于岛弧玄武岩型岩石和板内玄武岩型岩石。

普兰蛇绿岩的辉长岩脉中(La/Ce)N = 0.68~0.79、(La/Sm)N = 0.41~0.54、(La/Yb)N = 0.41~0.55, 均小于 1, 与 N-MORB 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图相似(表 3)。微量元素的原始地幔标准化蛛网图, 也反映了 N-MORB 的形成环境。辉长岩样品中呈现出不同的弱 Eu 异常, $\delta\text{Eu} = 0.95\sim 1.12$, 11PL003、11PL013、11PL016 和 11PL079 属于弱正 Eu 异常, 11PL008、11PL103、11PL111、11PL112 和 11PL122 均属于弱

Table 3. Trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of the gabbro, N-MORB, E-MORB and OIB (after Sun & McDonough, 1989) [11]

表 3. 本区辉长岩与 N-MORB、E-MORB、OIB 中的部分微量元素($\times 10^{-6}$) (据 Sun & McDonough, 1989) [11]

	11PL003-1	11PL008	11PL013	11PL016	11PL079	11PL103	11PL111	11PL112	11PL122	N-MORB	E-MORB	OIB
Hf	2.50	2.71	2.64	2.34	2.01	2.81	2.84	2.86	2.03	2.05	2.03	7.8
Zr	77.99	84.66	88.05	77.74	65.10	87.77	88.58	89.11	54.47	74	73	280
Nb	3.47	2.31	1.46	1.55	1.07	1.76	1.63	1.53	1.35	2.33	8.3	48
Ta	0.45	0.37	0.26	0.37	0.56	0.32	0.31	0.31	0.34	0.132	0.47	2.7
Nb	3.47	2.31	1.46	1.55	1.07	1.76	1.63	1.53	1.35	2.33	8.3	48

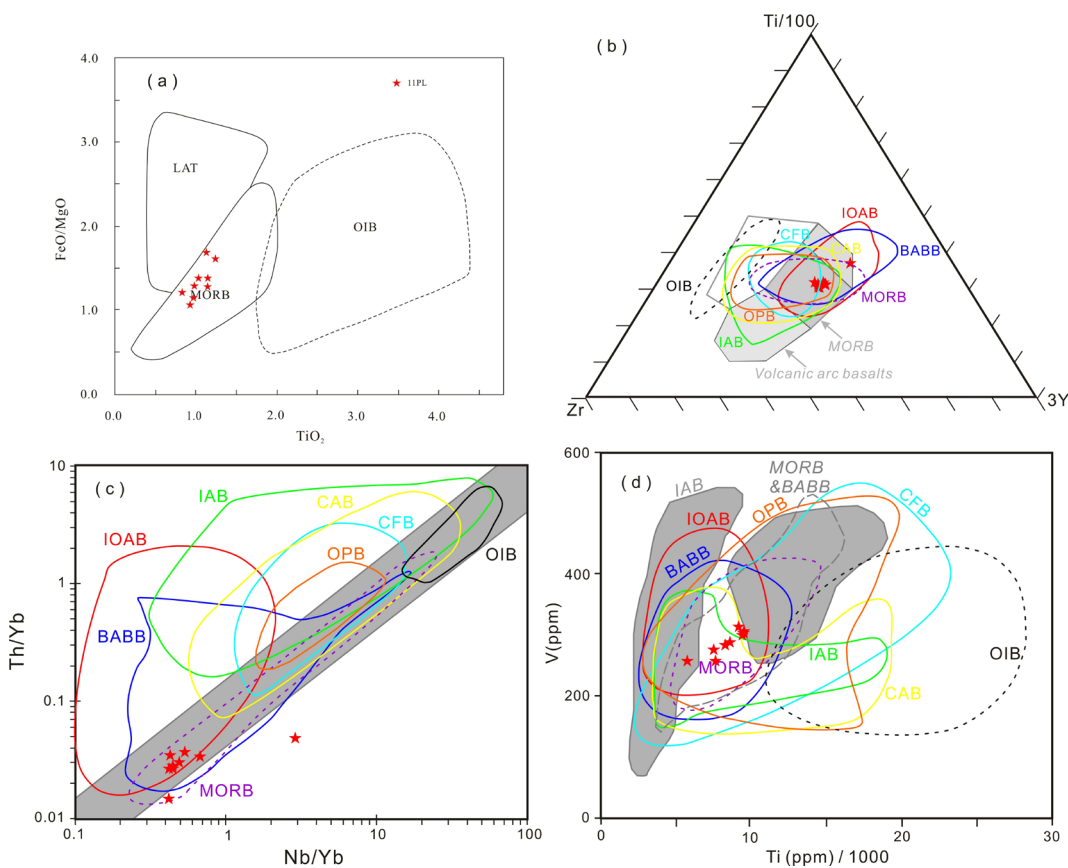


Figure 8. Discrimination diagrams for the gabbros of the Purang Complex. (a) $\text{TiO}_2\text{-FeO/MgO}$ (after Miyashiro, 1975 [27]); (b) Zr-Ti-Y diagram (after Pearce and Cann, 1973 [24]); (c) Nb/Yb-Th/Yb diagram (after Pearce, 2008 [25]); (d) V-Ti diagram (after Shervais, 1982 [28]); BABB: Back arc basalt, CAB: Continental arc basalt, CFB: Continental flood basalt, IAB: Island arc basalt, IOAB: Intra-oceanic arc basalt, MORB: Mid-ocean ridge basalt, OIB: Ocean island basalt, OPB: Oceanic plateau

图 8. 辉长岩的构造判别图解。(a) $\text{TiO}_2\text{-FeO/MgO}$ 图解(据 Miyashiro, 1975 [27]); (b) Zr-Ti-Y 图解(据 Pearce and Cann, 1973 [24]); (c) Nb/Yb-Th/Yb 图解(据 Pearce, 2008 [25]); (d) V-Ti 图解(据 Shervais, 1982 [28]); BABB: 弧后玄武岩, CAB: 大陆弧玄武岩, CFB: 大陆玄武岩, IAB: 岛弧玄武岩, IOAB: 洋内弧玄武岩, MORB: 洋中脊玄武岩, OIB: 洋岛玄武岩, OPB: 大洋高原玄武岩

负 Eu 异常, 但均属于弱 Eu 异常, $LREE/HREE = 1.23\sim 1.39$, $(La/Yb)_N = 0.41\sim 0.55$, 说明了结晶分异作用较低, 所以辉长岩的构造环境可用玄武岩的构造环境来判别, 据此进一步说明普兰蛇绿岩体中的辉长岩的特征与 N-MORB 环境特征相符合, 因此判定形成于 N-MORB 的环境。但结合稀土元素和微量元素的配分模式, 普兰蛇绿岩的辉长岩轻稀土亏损以及部分高场强元素的轻微亏损表明岩石也可能形成于弧后盆地的扩张环境。

由于锆石具有非常强的抗侵蚀能力, 所以目前是测定岩浆结晶的年龄的理想产物之一, 而且在辉长岩中, 锆石的成因比较单一, 其测试年龄结果的地质意义明确, 因此, 用辉长岩中的锆石来进行年代学的研究, 可以获得更可靠, 地质意义更加明确的年龄信息(图 9)。

对普兰岩体东部的休古嘎布蛇绿岩体与西部的东波蛇绿岩体的定年, 前人也做过一定的研究。休古嘎布蛇绿岩体所测的年龄为: 辉长岩 128 ± 1.1 Ma [18]、辉石岩 130 ± 0.5 Ma [18]和辉长岩 159.7 ± 0.5 Ma [17]。东波蛇绿岩体所测的年龄为: 辉绿岩 122.3 ± 2.4 Ma [19]、辉绿岩 126.7 ± 0.5 Ma [17]和辉绿岩 123.4 ± 0.8 Ma [17]。雅鲁藏布江蛇绿岩带中段中吉定蛇绿岩的形成年龄 123.0 ± 1.8 Ma [21], 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段中罗布莎蛇绿岩中的辉长辉绿岩的年龄, 通过 SHRIMP U-Pb 定年的结果为 162.9 ± 2.8 Ma [22], 通过 Sm-Nd 等时线得到的年龄为 177 ± 31 Ma [20], 通过对雅鲁藏布江西段蛇绿岩年代的定年发现, 其形成年龄为晚侏罗世到早白垩世。之前有学者得到的普兰蛇绿岩的年龄分别为: 辉绿岩 120.2 ± 2.3 Ma [16]、辉长岩 130 ± 3 Ma [1]、辉绿岩 123.8 ± 1.1 Ma [17]和辉绿岩 123.4 ± 1.1 Ma [17]。刘钊等认为普兰蛇绿岩的形成, 类似于形成于 N-MOR 环境的阿曼蛇绿岩, 我们得到的普兰蛇绿岩中辉长岩的年龄为 119.4 ± 5.2 Ma~ 122.1 ± 7.1 Ma, 表明形成于早白垩世。通过对辉长岩脉中挑选出的锆石 LA-ICP-MS 定年所得到的年龄略晚于前人所得到的年龄。总体来看, 雅鲁藏布江蛇绿岩带西段的年龄在 119 Ma~130 Ma 之间。根据之前学者们得到的结论, 雅鲁藏布江带整体呈现西晚东早的趋势, 而本文得到的结论也证实了雅江带西段年龄要晚于东段。

7. 结论

本文主要对雅鲁藏布江蛇绿岩带西段普兰蛇绿岩体中的基性脉进行研究, 对辉长岩的样品进行实验处理, 得到辉长岩的岩石学和地球化学数据, 分析得到以下结论:

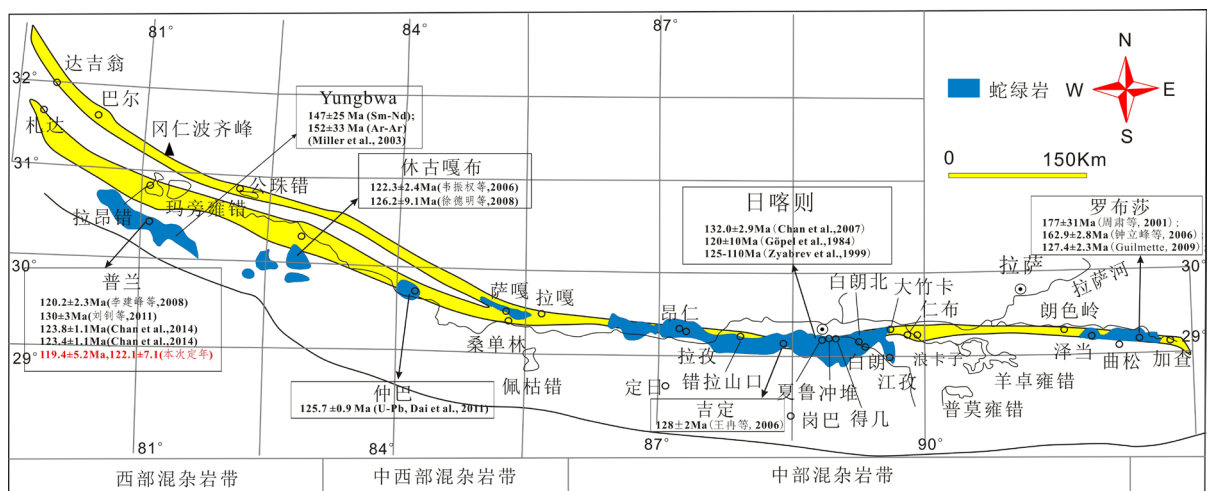


Figure 9. The Yarlung Zangbo suture zone area showing the west to east localization and ages of the major ophiolitic massifs of the Yarlung Zangbo Suture Zone [30]

图 9. 雅鲁藏布江缝合带地区自西向东主要蛇绿岩带的位置及年龄图(据朱弟成, 2008 修改) [30]

(1) 根据辉长岩主量元素与微量元素的关系特征,可以判断出辉长岩脉为碱性系列且为洋中脊玄武岩(MORB)或弧后盆地的扩张环境。

(2) 通过对辉长岩脉中挑选出的锆石 LA-ICP-MS 定年,表明普兰辉长岩脉的形成年龄为 119.4 ± 5.2 Ma~ 122.1 ± 7.1 Ma,为早白垩世。

(3) 雅江带蛇绿岩年龄分布图中可以发现整体呈现西晚东早的趋势。

致 谢

在论文编写过程中,衷心感谢我的导师李旭平老师对我学术上的指导和帮助,李老师给我提供了各种意见与支持,并帮助我解决各种问题,使我的论文条理化、规范化。李老师学识渊博、治学严谨,作为我的导师让我感到万分的荣幸。

参考文献 (References)

- [1] 刘钊,李源,熊发挥,等.西藏西部普兰蛇绿岩中的 MOR 型辉长岩:岩石学和年代学.岩石学报,2011,27(11): 3269-3279.
- [2] 肖序常,万子益,李光岑,等.雅鲁藏布江缝合带及邻近区构造及演化.地质学报,1983(2): 205-212.
- [3] 孙东,王道永.雅鲁藏布江缝合带中段构造特征及成因模式新见解.地质学报,2011,85(1): 56-65.
- [4] 张旗,钱青,王焰.蛇绿岩岩石组合及洋脊下岩浆作用.岩石矿物学杂志,2000,1(19): 1-7.
- [5] Barth, M.G., Mason, P.R.D., Davies, G.R., Dijkstra, A.H. and Drury, M.R. (2003) Geochemistry of the Othris Ophiolite, Greece: Evidence? *Journal of Petrology*, **44**, 1759-1785. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/egg058>
- [6] 邱瑞照,邓晋福,周肃,等.青藏高原西部蛇绿岩类型:岩石学与地球化学证据.地学前缘,2005,12(2): 277-291.
- [7] 徐向珍,杨经绥,郭国林,等.雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄榄岩的岩石学研究.岩石学报,2011,27(11): 3179-3196.
- [8] 鲍佩声,王希斌,彭根永,等.中国铬铁矿床.北京:科学出版社,1999: 54-97.
- [9] 潘桂棠,陈智梁,李兴振.东特提斯地质构造形成演化.北京:地质出版社,1997: 1-100.
- [10] 王泽利,刘建国,李旭平,等.西藏普兰超镁铁岩体东部锆尖晶石矿物学特征及其地质意义.地质论评,2012,6(58): 1038-1045.
- [11] Sun, S.S. and Mcdonough, W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society of London Special Publications*, **42**, 313-345. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- [12] Hugh, R.R. and Hugh, R. (1993) Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific & Technical, Essex; Wiley & Sons, New York, 1-384.
- [13] Yuan, H., Gao, S., Liu, X., Li, H., Günther, D. and Wu, F. (2004) Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, **28**, 353-370. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x>
- [14] Anonymous (1972) Penrose Field Conference on Ophiolites. *Geotimes*, **17**, 14-15.
- [15] Condie, K.C. (1989) Geochemical Changes in Basalts and Andesites across the Archean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance. *Lithos*, **23**, 1-18. [http://dx.doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90020-0](http://dx.doi.org/10.1016/0024-4937(89)90020-0)
- [16] 李建峰,夏斌,刘立文,等.西藏普兰地拉昂错蛇绿岩中辉绿岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质通报,2008,27(10): 1739-1743.
- [17] Chan, G.H.N., Aitchison, J.C., Crowley, Q.G., Horstwood, M.S.A., Searle, M.P., Parrish, R.R. and Chan, J.S.L. (2014) U-Pb Zircon Ages for Yarlung Tsangpo Suture Zone Ophiolites, Southwestern Tibet and Their Tectonic Implications. *Gondwana Research*, **27**, 719-732.
- [18] 熊发挥,杨经绥,梁凤华,等.西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩中锆石 U-Pb 定年及地质意义[J].岩石学报,2011,27(11): 3223-3238.
- [19] 韦栋梁,夏斌,周国庆,等.西藏泽当蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄及其意义[J].地球学报,2006,27(1): 31-34.
- [20] 周肃,莫宣学, Mahoney, J.J., 等.西藏罗布莎蛇绿岩中辉长辉绿岩 Sm-Nd 定年及 Pb, Nd 同位素特征[J].科学通

- 报, 2001, 46(16): 1387-1390.
- [21] 王冉, 夏斌, 周国庆, 等. 西藏吉定蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 114-117.
- [22] 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年[J]. 地质论评, 2006, 52(2): 224-229.
- [23] Kretz, R. (1983) Symbols for Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, **68**, 277-279.
- [24] Pearce, J.A. and Cann, J.R. (1973) Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, **19**, 290-300. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5)
- [25] Pearce, J.A. (2008) Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, **100**, 14-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- [26] Shervais, J.W. (1982) Ti-V Plots and the Petrogenesis of Modern and Ophiolitic Lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, **59**, 101-118. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90120-0](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(82)90120-0)
- [27] Miyashiro, A. (1975) Classification Characteristic and Origin of Ophiolites. *The Journal of Geology*, **83**, 249-281. <http://dx.doi.org/10.1086/628085>
- [28] Shervais, J.W. (1982) Ti-V Plots and the Petrogenesis of Modern and Ophiolitic Lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, **59**, 101-118. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90120-0](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(82)90120-0)
- [29] Macdonald, G.A. (1968) A Contribution to the Petrology of Tutuila, American Samoa. *Geologische Rundschau*, **57**, 821-837. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01845367>
- [30] 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 新特提斯演化的热点与洋脊相互作用: 西藏南部晚侏罗世-早白垩世岩浆作用推论. 岩石学报, 2008, 24(2): 225-237.
- [31] McDonough, W.F. and Sun, S.S. (1995) The Composition of The Earth. *Chemical Geology*, **120**, 223-254. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)