

湖南道县虎子岩煌斑岩地球化学特征及其构造意义

梁恩云

湖南省地质调查院, 湖南 长沙

Email: 8832188@163.com

收稿日期: 2021年7月12日; 录用日期: 2021年8月6日; 发布日期: 2021年8月12日

摘要

本文选择处于钦杭带中段的湖南道县虎子岩煌斑岩作为研究载体, 通过地球化学特征探讨其蕴含的构造意义。虎子岩煌斑岩 $w(\text{SiO}_2)$ 为44.70%~49.13%, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为2.21%~4.40%, $w(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ 为1.80~4.84, 属钾质-超钾质钙碱性煌斑岩。其稀土总量 ΣREE 为 176.64×10^{-6} ~ 250.35×10^{-6} , LREE/HREE平均为8.36, 具轻稀土富集、重稀土亏损、轻微的Eu、Ce负异常的特点; 微量元素K、Th、Nb、Ce、P、Hf、Ti为负异常, 正异常的元素有Ba、U、Zr。研究认为, 虎子岩煌斑岩来源于富集地幔, 在晚侏罗世燕山运动的NWW向挤压转为拉张过程中沿断裂上升侵位, 岩浆在经历了板块俯冲导致部分熔融和分离结晶后形成的, 在成岩过程中没有发生明显的地壳混染作用。

关键词

煌斑岩, 地球化学特征, 构造意义, 钦杭带中段, 虎子岩

Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Huziyan Lamprophyre in Daoxian County, Hunan

Enyun Liang

Hunan Institute of Geological Survey, Changsha Hunan

Email: 8832188@163.com

Received: Jul. 12th, 2021; accepted: Aug. 6th, 2021; published: Aug. 12th, 2021

Abstract

The Huziyan lamprophyre, located in the middle of Qinzhou-Hangzhou Belt, is chosen as the research carrier to explore its structural significance through geochemical characteristics. The Huziyan lamprophyre's contents of SiO_2 range from 44.70% to 49.13%, its contents of $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ range from 2.21% to 4.40%, and its values of $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ range from 1.80 to 4.84. It belongs to the potash-ultrapotash calc-alkaline lamprophyre. The values of ΣREE ranges from 176.64×10^{-6} to 250.35×10^{-6} , and the values of LREE/HREE is 8.36 on average. It has the characteristics of LREE enrichment, HREE deficiency and Eu, Ce slight negative anomaly. The trace elements like K, Th, Nb, Ce, P, Hf, Ti have negative anomaly, and the elements like Ba, U, Zr have positive anomaly. It is considered that, the Huziyan lamprophyre is originated from the enriched mantle, and it is emplaced along the fault, made in one period of Yanshanian movement during middle and late Jurassic, and in this period the process of compression with NWW-trending changes to extension. The magma was formed by partial melting and a few separation-crystallization after the plate subduction, and here is no obvious crustal contamination during the diagenetic process.

Keywords

Lamprophyre, Geochemical Characteristics, Tectonic Significance, Qinzhou-Hangzhou Belt, Huziyan

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近年,关于煌斑岩研究较多[1]-[6]。关于煌斑岩的研究成因,目前主要存在三种不同的模式:一是富集地幔部分熔融模式[7]-[17],二是基性岩浆陆壳混染模式[18]-[23];三是幔源 + 陆壳混染模式[24] [25] [26] [27]。关于煌斑岩形成的构造环境,一般认为是伸展环境下形成的[16] [23] [24] [28] [29] [30] [31]。也有学者认为是板块俯冲碰撞的产物[11] [32]。

湖南道县虎子岩地区,位于扬子与华夏两大古陆块中间巨型构造结合带——钦杭带中段。关于钦杭带中段的边界,仅是从地球物理角度进行了解释[33],还缺少地表证据。所以,关于钦杭带中段的边界问题还有待进一步深入探讨。对虎子岩地区的研究,前人曾有过玄武岩及其捕虏体的报道[34] [35] [36]。鉴于煌斑岩是起源于地幔甚至更深区域的岩浆环境,对其研究是了解大陆岩石圈地幔物质成分、壳幔相互作用及判别大地构造环境的重要地质窗口。本文拟通过虎子岩地区煌斑岩的常量元素、稀土元素、微量元素特征,探讨其源区特征及相关的壳幔过程,展现虎子岩地区煌斑岩对钦杭带大地构造演化所蕴含的意义。

2. 区域地质概况

湖南道县虎子岩,位于扬子与华夏陆块之间的构造结合带中段,南岭东西向复杂构造带中西段,宁远-桂阳坳褶带的西部。本区为一套沉积岩分布区,地层分布受区域构造控制,均呈北北东向展布,地层以泥盆系、石炭系最为发育,其次为侏罗系、白垩系。泥盆系早期主要为一套滨浅海相碎屑沉积,中

晚期主要为一套碳酸盐台地沉积；石炭系为一套以碳酸盐岩为主间夹陆屑的沉积；侏罗系为一套河流-湖泊相的陆源碎屑沉积；白垩系为山麓洪积扇-湖泊浅水沉积。区内岩浆活动较弱，主要为煌斑岩(图 1)。

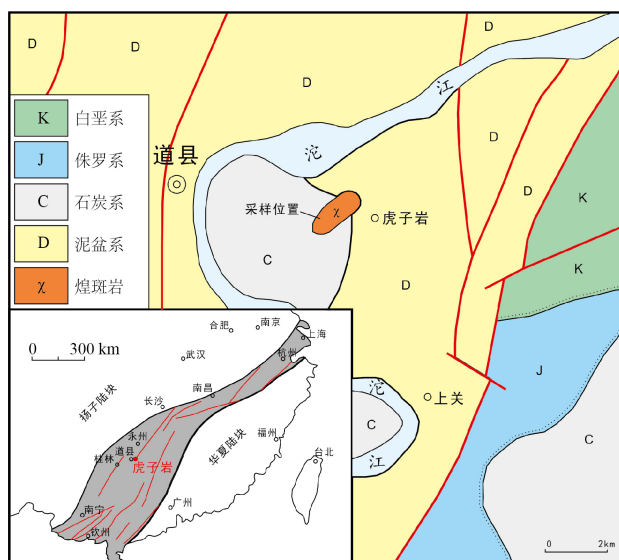


Figure 1. Geological map of the Huilongxu lamprophyre

图 1. 虎子岩地区煌斑岩地质简图

3. 煌斑岩矿物学特征

虎子岩地区煌斑岩出露面积约 0.1 km²，喷发或侵入于泥盆系、石炭系、侏罗系等地层中，平面上呈北东向延长条状；剖面上呈楔形，据钻探揭露，岩体向深部变窄。

岩石呈青黑色，煌斑结构，块状构造，致密坚硬(图 2)。斑晶含量约 20%，由橄榄石及少量辉石组成，橄榄石呈半自形粒状，杂乱分布，粒度一般 0.1~0.5 mm，部分 0.5~3 mm，部分被蛇纹石交代呈假像；辉石呈自形-半自形柱状，为单斜辉石，零散分布，粒度 0.4~0.7 mm，被黑云母交代。基质由单斜辉石、白榴石及少量黑云母、长石组成，其中单斜辉石约 40%，白榴石约 30% (图 3)。



Figure 2. Specimen characteristics of Huziyan lamprophyre

图 2. 虎子岩煌斑岩标本特征

4. 样品制备与测试分析

采样时, 4 件样品(HZY-1~HZY-4)连线近垂直煌斑岩出露的短轴方向分布, 间距约 3 m, 尽量选择新鲜的岩石作为样品, 由于岩石极易风化, 有 2 件样品(HZY-3、HZY-4)相对风化强些。每件样品重量 5 kg 左右。经过破碎、筛分后粉碎至 60 目, 每件样品保证不交叉污染, 重量保证 100 g, 并留存副样。样品的分析在湖南省地质调查院测试中心完成, 使用仪器有 ZSX PrimusIV 型波长色散 X 射线荧光光谱仪, iCAP Q 型电感耦合等离子质谱分析仪, AFS-830 型原子荧光仪, XGY-1011A 型原子荧光仪, V-1100D 型紫外可见分光光度计, AES-8000 型全谱交直流电弧发射光谱仪等, 检测环境温度 20℃~24℃、湿度 58%~64%, 检测依据为 GB/T 14506-2010。



Figure 3. Photomicrograph of Huziyan lamprophyre
图 3. 虎子岩煌斑岩显微照片

5. 测试结果分析

5.1. 常量元素特征

本次研究分析了 4 件样品, 另外收集了 1 件[37]关于虎子岩煌斑岩的数据(见表 1), 可以看出, 虎子岩煌斑岩 $w(\text{SiO}_2)$ 为 44.70%~49.13%, 平均 47.45%, 属于基性岩类; $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 2.21%~4.40%, 平均 3.77%, $w(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ 为 1.80~4.84, 平均 3.57; $w(\text{MgO})$ 为 12.76%~15.15%, 平均 13.76%, $\text{Mg}^\#$ 值为 70.8~79.1, 平均 73.32; 岩石里特曼指数 δ 为 2.87~4.04, 平均 3.35。在 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - w(\text{SiO}_2)$ 图上(图 4(a)) [38]样品大都落在钙碱性煌斑岩与碱性煌斑岩相交的区域内, 样品 HZY-3 落在钙碱性煌斑岩附近; 在 $\text{K}/(\text{K} + \text{Na}) - \text{K}/\text{Al}$ 分类图上(图 4(b)) [39]样品大都落在超钾质煌斑岩范围内, 而样品 HZY-3 落在钾质煌斑岩范围内。在 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) - w(\text{TiO}_2)$ 与 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{MgO})$ 图解中(图 5) [40], 所有样品全部落入钙碱性煌斑岩范围内。可以认为, 虎子岩煌斑岩为钾质 - 超钾质钙碱性煌斑岩。

Table 1. Analytical results of major elements from Huziyan lamprophyre (%)

表 1. 虎子岩煌斑岩常量元素分析结果(%)

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Mg [#]	备注
HYZ-1	48.87	0.69	10.32	7.89	1.42	0.13	12.87	5.59	0.86	3.47	0.41	7.50	72.9	本次
HYZ-2	49.13	0.69	10.35	7.83	1.53	0.13	12.76	5.41	0.93	3.47	0.39	7.38	72.6	本次
HYZ-3	44.70	0.52	8.34	7.47	3.57	0.13	14.25	14.05	0.79	1.42	0.51	4.24	71.2	本次
HYZ-4	46.14	0.57	8.80	7.07	3.76	0.13	13.75	12.25	0.61	2.95	0.52	3.45	70.8	本次
DX1	48.4	0.67	10.03	2.31	5.05	0.18	15.15	9.09	0.98	3.36	0.43	4.35	79.1	[34]

根据常量元素计算出标准矿物组成,主要有长石(16.38%~46.03%,平均 35.04%)、辉石(31.26%~46.44%,平均 40.28%)、橄榄石(11.46%~25.88%,平均 19.53%),其次为钛铁矿(0.7%~1.02%)、磁铁矿(0.53%~2.48%),含极少量白榴石、磷灰石、软玉、自然硫等。长石中碱性长石(1.4%~22.4%,平均 15.45%)少于斜长石(13.2%~24.13%,平均 19.59%),辉石中透辉石(11.04%~46.44%,平均 26.77%)多于紫苏辉石(0%~31.72%,平均 13.51%)。

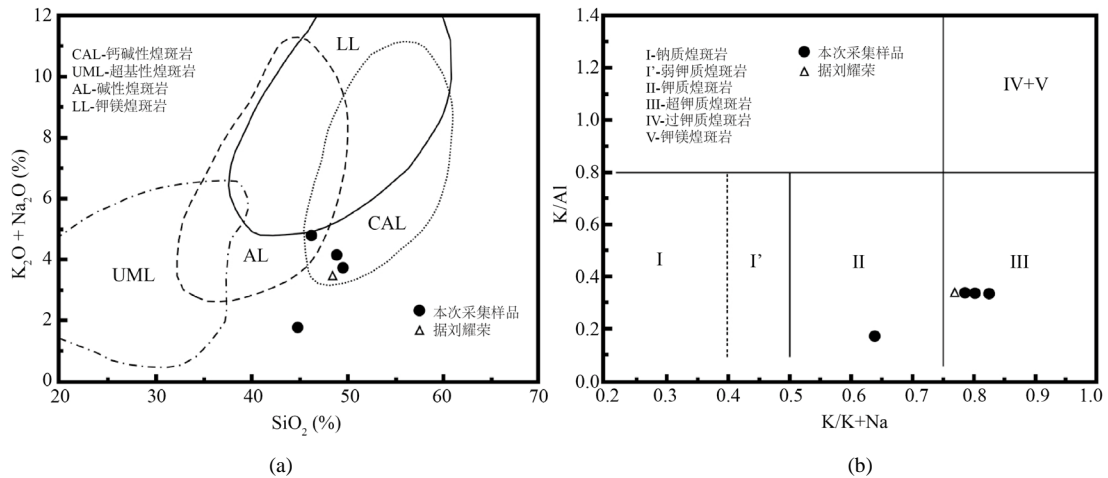


Figure 4. $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ vs. $w(\text{SiO}_2)$ diagram (a) and K/Al vs. $\text{K}/(\text{K} + \text{Na})$ diagram (b) of Huziyan lamprophyre [39]

图 4. 虎子岩煌斑岩 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - w(\text{SiO}_2)$ 图(a) [38]和 $\text{K}/\text{Al} - \text{K}/(\text{K} + \text{Na})$ 图(b) [39]

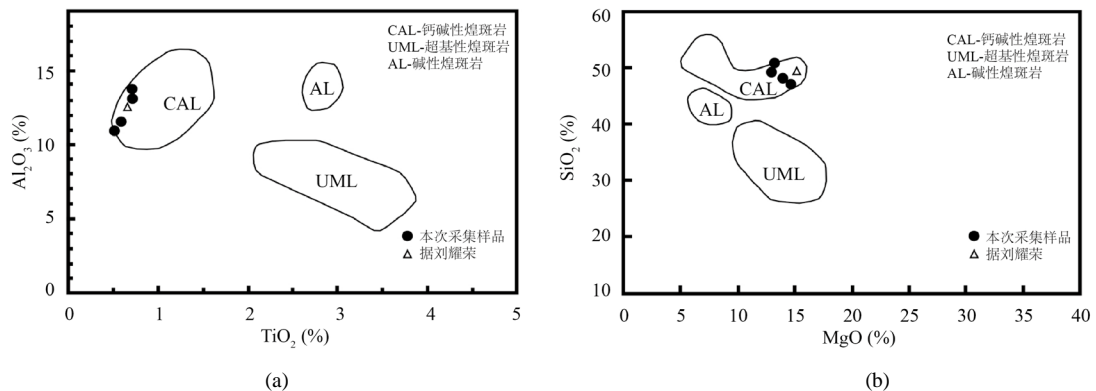


Figure 5. $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs. $w(\text{TiO}_2)$ diagram (a) and $w(\text{SiO}_2)$ vs. $w(\text{MgO})$ diagram (b) of Huziyan lamprophyre [40]

图 5. 虎子岩煌斑岩 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) - w(\text{TiO}_2)$ 图(a) [40]和 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{MgO})$ 图(b) [40]

5.2. 稀土元素特征

虎子岩煌斑岩稀土元素含量见表 2。样品的稀土总量 ΣREE 为 $176.64 \times 10^{-6} \sim 250.35 \times 10^{-6}$, 平均 216.25×10^{-6} 。其中轻稀土 LREE 为 $155.96 \times 10^{-6} \sim 225.43 \times 10^{-6}$, 平均 193.23×10^{-6} ; 重稀土 HREE 为 $20.68 \times 10^{-6} \sim 24.92 \times 10^{-6}$, 平均 23.02×10^{-6} ; LREE/HREE 为 7.54~9.05, 平均为 8.36; La_N/Yb_N 为 10.12~16.14, 平均 13.02; δEu 为 0.89~0.98, 平均 0.92, 呈极微弱的 Eu 负异常; δCe 为 0.94~0.98, 平均 0.96, 也呈极微弱的 Ce 负异常。球粒陨石标准化分布型式图(图 6(a))中, 表现为左陡倾、右平缓, 反映了轻稀土富集、重稀土亏损的特点。

5.3. 微量元素特征

虎子岩煌斑岩微量元素含量见表3。在球粒陨石标准化蛛网图(图6(b))中可以看出,整体呈不规则的“M”型。高场强元素K、Th、Nb、Ce、P、Hf、Ti、为负异常,Zr、La、Sm、U为正异常;大离子亲石元素K、Rb为负异常,Ba为正异常;其中Ba元素特别富集,P元素特别亏损。与全球云斜煌斑岩过渡元素含量[41]相比,具有高Sc、Cr、Co、Ni、Cu、Ba、Nb的特点,其中Nb高出7倍;V、Zn、Rb、Th、U、Ta、Sr、Zr、Hf等元素含量则较之偏少,而Ta元素含量仅全球云斜煌斑岩平均值的3%左右。

Table 2. Analytical results of rare earth elements from Huziyan lamprophyre (10^{-6})

表 2. 虎子岩煌斑岩稀土元素分析结果(10^{-6})

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
HYZ-1	42.6	81.7	10.0	39.9	8.20	2.31	7.52	1.23	6.47	1.20	3.23	0.463	2.96	0.443	21.7
HYZ-2	36.1	69.3	8.35	33.5	6.79	1.92	6.41	1.04	5.99	1.03	2.84	0.412	2.56	0.398	22.2
HYZ-3	53.1	98.0	12.3	49.2	10.0	2.83	9.31	1.40	6.97	1.19	2.95	0.392	2.36	0.348	24.8
HYZ-4	48.2	90.0	11.3	45.2	9.27	2.85	8.49	1.30	6.46	1.09	2.71	0.366	2.23	0.327	22.8

Table 3. Analytical results of trace earth elements from Huziyan lamprophyre (10^{-6} , Au $\times 10^{-9}$)

表 3. 虎子岩煌斑岩微量元素分析结果(10^{-6} , Au $\times 10^{-9}$)

样号	W	Sn	Mo	Bi	Cu	Pb	Zn	Ag	As	Sb	Hg	Sr	Ba	V	Th	U	Cl
HYZ-1	1.35	2.11	0.80	0.28	70.0	20.2	76.6	0.08	2.25	0.32	0.01	500	1337	175	10.06	2.64	74.3
HYZ-2	1.30	1.60	0.60	0.25	59.4	18.4	60.7	0.06	1.19	0.15	0.01	422	1278	156	8.60	2.47	112.9
HYZ-3	0.50	1.74	0.92	0.29	71.8	18.6	69.6	0.18	1.78	0.15	0.01	1278	2193	157	10.70	4.06	58.4
HYZ-4	0.41	1.61	0.43	0.28	68.7	17.2	62.6	0.13	1.50	0.12	0.01	1181	2972	144	9.44	3.56	90.5

样号	Co	Ni	Li	Be	Ta	Nb	Zr	Hf	Rb	Au	Cs	Cr	Ga	Sc	Cd	F	B
HYZ-1	50.3	390.86	43.8	2.13	0.77	11.9	116	3.29	85.7	0.56	2.42	1020	13.5	30.9	0.29	862	5.60
HYZ-2	48.9	386.81	36.3	1.82	0.66	10.5	117	3.30	76.7	0.43	3.59	991	11.7	26.3	0.70	767	5.60
HYZ-3	55.2	607.77	33.4	2.43	0.55	9.7	113	3.21	85.7	0.30	268	955	9.8	22.1	0.59	1830	8.80
HYZ-4	53.6	600.62	26.2	2.17	0.48	8.7	108	3.02	41.5	0.34	71.4	952	9.6	20.8	0.21	1744	12.0

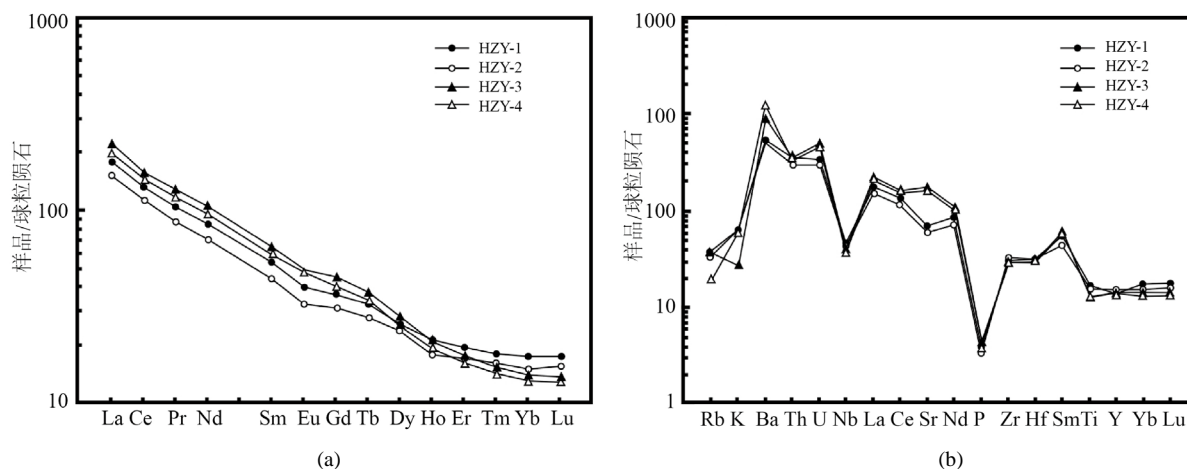


Figure 6. Chondrite-normalized REE patterns (a) and chondrite-normalized trace element spider diagrams (b)

图 6. 球粒陨石标准化 REE 模式图(a)和球粒陨石标准化微量元素蛛网图(b)

6. 讨论

6.1. 岩浆起源

虎子岩煌斑岩具有低 SiO_2 高 MgO 的常量元素特点, TiO_2 含量 0.63% 左右, 比较接近幔源原生岩浆[42]。虎子岩煌斑岩的 $w(\text{Ta}/\text{La})$ 值为 0.01~0.018, 平均 0.014, 低于原始地幔值(0.059) [43]; $w(\text{Nb}/\text{Ta})$ 值为 15.49~17.90, 平均 16.80, 低于原始地幔值(17.39); $w(\text{Zr}/\text{Hf})$ 值为 35.07~35.64, 平均 35.41, 低于原始地幔值(36.23); $w(\text{Nb}/\text{Ta})$ 值与 $w(\text{La}/\text{Yb})$ 值不呈地壳混染的负相关关系(图 7(a)) [44]; $w(\text{Y}/\text{Nb}) - w(\text{Zr}/\text{Nb})$ 图解(图 7(b)) [45] 中, 虎子岩煌斑岩落在了富集地幔附近。

虎子岩煌斑岩 $\text{Mg}^\#$ 值为 70.8~79.1, 接近地幔部分熔融形成的原始岩浆值(约 73) [46]; $w(\text{Ba})$ 为 1278×10^{-6} ~ 2972×10^{-6} , $w(\text{Sr})$ 为 422×10^{-6} ~ 1278×10^{-6} , 明显高于地壳($w(\text{Ba}) = 456 \times 10^{-6}$, $w(\text{Sr}) = 320 \times 10^{-6}$) [47], 单独的地壳混染不可能造成这么高的值。在判断岩石分离结晶和部分熔融的趋势图解中(图 8(a)) [48], 样品 La/Sm 与 La 之间的相关性不明显, 在 $w(\text{Th}/\text{Zr}) - w(\text{Nb}/\text{Zr})$ 图解中(图 8(b)) [49], 样品也没有明显的相关性, 表现出虎子岩煌斑岩可能经历了部分熔融与分离结晶。

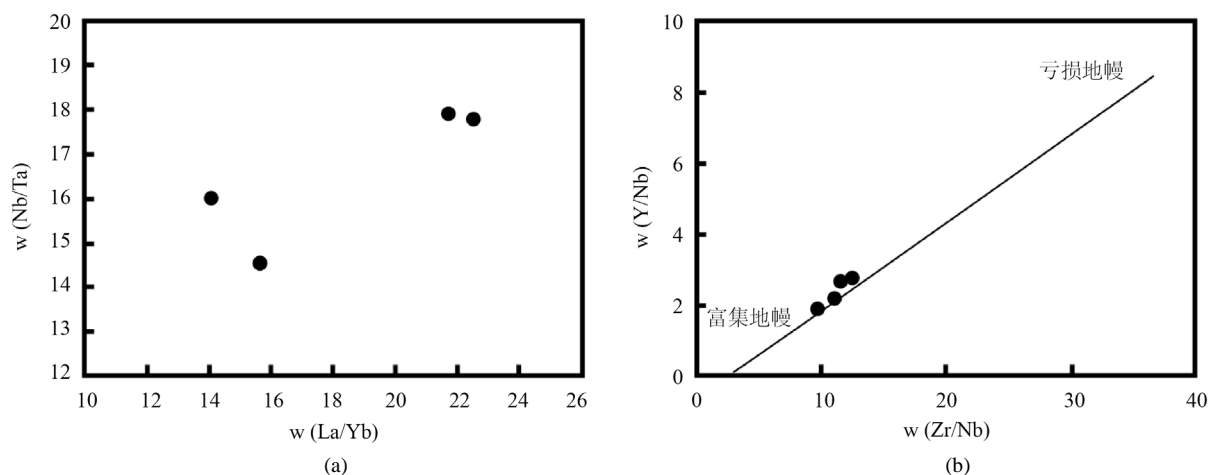


Figure 7. $w(\text{Nb}/\text{Ta})$ vs. $w(\text{La}/\text{Yb})$ diagram (a) and $w(\text{Y}/\text{Nb})$ vs. $w(\text{Zr}/\text{Nb})$ diagram (b) of Huziyan lamprophyre [45]

图 7. 虎子岩煌斑岩 $w(\text{Nb}/\text{Ta}) - w(\text{La}/\text{Yb})$ 图(a) [44] 和 $w(\text{Y}/\text{Nb}) - w(\text{Zr}/\text{Nb})$ 图(b) [45]

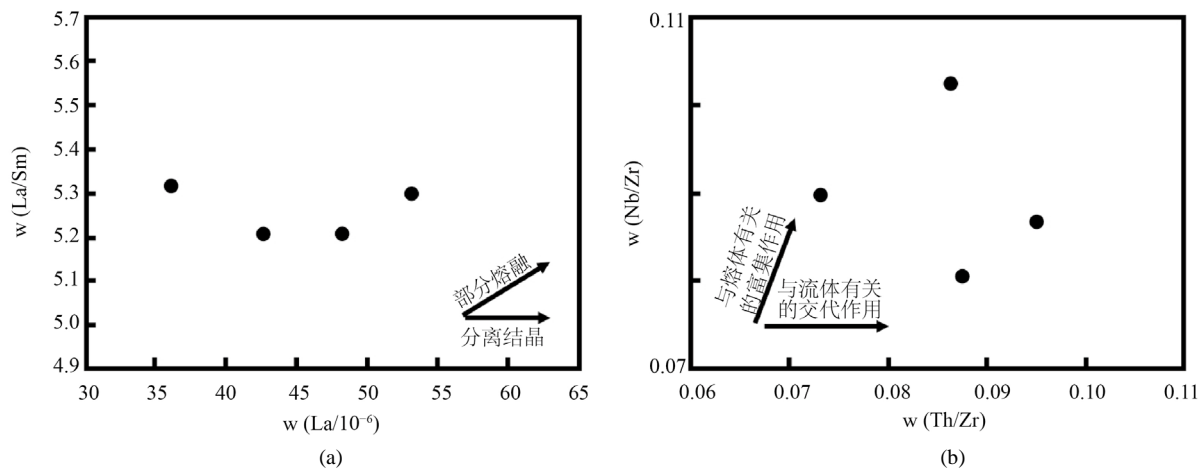


Figure 8. $w(\text{La}/\text{Sm})$ vs. $w(\text{La}/10^{-6})$ diagram and $w(\text{Nb}/\text{Zr})$ vs. $w(\text{Th}/\text{Zr})$ diagram of Huziyan lamprophyre [49]

图 8. 虎子岩煌斑岩 $w(\text{La}/\text{Sm}) - w(\text{La}/10^{-6})$ 图(a) [48] 和 $w(\text{Nb}/\text{Zr}) - w(\text{Th}/\text{Zr})$ 图(b) [49]

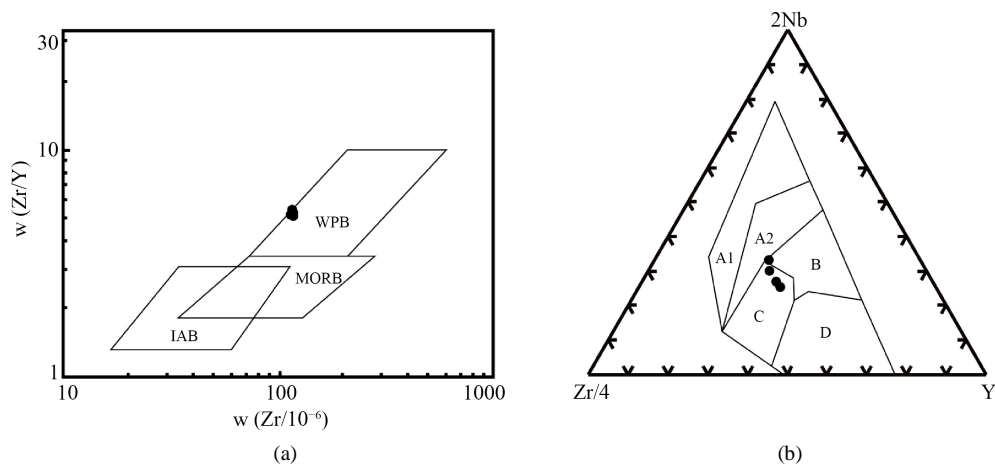
虎子岩煌斑岩 $w(\text{Ni})$ 为 $386.81\sim 607.77 \times 10^{-6}$, 平均 496.52×10^{-6} , $w(\text{Cr})$ 为 $952\sim 1020 \times 10^{-6}$, 平均 980×10^{-6} , 相对于原始地幔 ($w(\text{Ni}) > 400\sim 500 \times 10^{-6}$, $w(\text{Cr}) > 500 \times 10^{-6}$) [50], 可能经历过橄榄石、辉石的结晶; 微小的 Eu 负异常, 也表现出斜长石的分异结晶作用。

综上, 虎子岩煌斑岩是地幔岩浆在经历了板块俯冲导致部分熔融和分离结晶后形成的。

6.2. 构造环境

在 $w(\text{Zr}/\text{Y} - \text{Y}/10^{-6})$ 图解[51] (图 9(a))中, 虎子岩煌斑岩投点落在板内碱性玄武岩边缘, 在 Nb-Zr-Y 图解[52] (图 9(b))中, 投点均落入板内拉斑玄武岩范围, 可以说, 虎子岩煌斑岩的形成环境属于大陆板内环境。虎子岩煌斑岩的 $w(\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2)$ 为 2.70~5.16, $w(\text{TiO}_2)$ 为 0.54%~0.71%, 据 Rogers [53], 该煌斑岩与板内低 $w(\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2)$ 、高 $w(\text{TiO}_2)$ 的岩石特征不同, 而与俯冲地区的高 $w(\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2)$ 、低 $w(\text{TiO}_2)$ 相似。这可能是因为, 虎子岩地区处于华夏陆块向扬子陆块俯冲拼合的部位、而煌斑岩侵位时二者已经连成统一的华南大陆, 因而属于大陆板内环境。

前人的年代学研究表明, 虎子岩二长花岗岩经历的最后一次岩浆事件时间是 229~232 Ma [54], 虎子岩辉长岩捕虏体形成时代为 250~200 Ma [55] [56], 玄武岩 Ar-Ar 年龄为 152~147 Ma [57]。自晚三叠世开始, 湖南道县虎子岩地区所在的扬子、华夏陆块受古太平洋板块俯冲影响, 受南北向挤压, 岩浆活化; 至中侏罗世时期, 经历了挤压减弱、应力松弛, 后碰撞环境下的富集地幔部分熔融, 虎子岩煌斑岩在晚侏罗世燕山运动的 NWW 向挤压转为拉张过程中沿断裂上升侵位形成。



A、B、C 分别代表 WPB、IAB、MORB。A1 + A2: 板内碱性玄武岩; A2 + C: 板内拉斑玄武岩; B: P 型 MORB; D: N 型 MORB; C + D: 火山弧玄武岩。

Figure 9. (a) $w(\text{Zr}/\text{Y})$ vs $w(\text{Zr}/10^{-6})$ diagram and Nb-Zr-Y diagram (b) for Huziyan lamprophyre
图 9. 虎子岩煌斑岩 $w(\text{Zr}/\text{Y} - \text{Zr}/10^{-6})$ 图解(a) [51]和 Nb-Zr-Y 图解(b) [52]

7. 结论

(1) 虎子岩煌斑岩属于基性岩类, 属于钾质 - 超钾质钙碱性煌斑岩。岩石来源于富集地幔, 岩浆在经历了板块俯冲导致部分熔融和分离结晶后形成的, 在成岩过程中没有发生明显的地壳混染作用。

(2) 虎子岩煌斑岩在晚侏罗世燕山运动的 NWW 向挤压转为拉张过程中沿断裂上升侵位形成。

致 谢

感谢湖南省自然科学基金、中国地质调查局地质调查项目的资助, 感谢彭云益高级工程师在野

外采样的帮助,感谢湖南省地质调查院测试中心对样品测试的精心安排,感谢审稿老师提出的宝贵意见!

基金项目

本文得到湖南省自然科学基金项目(编号 2019JJ50292)、中国地质调查局地质调查项目(DD20160032-17)资助。

参考文献

- [1] Stoppa, F., Rukhlov, A.S., Bell, K., Schiazza, M. and Vichi, G. (2014) Lamprophyres of Italy: Early Cretaceous Alkaline Lamprophyres of Southern Tuscany, Italy. *Lithos*, **188**, 97-112. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.010>
- [2] Palke, A.C., Renfro, N.D. and Berg, R.B. (2016) Origin of Sapphires from a Lamprophyre Dike at Yogo Gulch, Montana USA: Clues from Their Melt Inclusions. *Lithos*, **260**, 339-344. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.06.004>
- [3] Xu, D., Deng, T., Chi, G., Wang, Z., Zou, F., Zhang, J., et al. (2017) Gold Mineralization in the Jiangnan Orogenic Belt of South China: Geological, Geochemical and Geochronological characteristics, Ore Deposit-Type and Geodynamic Setting. *Ore Geology Reviews*, **88**, 565-618. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.02.004>
- [4] Yang, Z.-Y. and Jiang, S.-Y. (2018) Diverse Lamprophyres Origins Corresponding to Lithospheric Thinning: A Case Study in the Jiurui District of Middle-Lower Yangtze River Belt, South China Craton. *Gondwana Research*, **54**, 62-80. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.10.004>
- [5] 梁恩云, 陈迪, 邹光均, 熊苗. 湖南江永回龙圩煌斑岩地球化学特征及其构造意义[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(4): 640-646.
- [6] Li, X.-Y., Li, S.-Z., Suo, Y.-H., Somerville, I.D., Huang, F., Liu, X., et al. (2018) Early Cretaceous Diabases, Lamprophyres and Andesites-Dacites in Western Shandong, North China Craton: Implications for Local Delamination and Paleo-Pacific Slab Rollback. *Journal of Asian Earth Sciences*, **160**, 426-444. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.08.005>
- [7] Rock, N.M.S. and Groves, D.I. (1988) Can Lamprophyres Resolve the Genetic Controversy over Mesothermal Gold Deposit? *Geology*, **16**, 538-541. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016%3C0538:CLRTGC%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016%3C0538:CLRTGC%3E2.3.CO;2)
- [8] 朱炳泉, 张玉泉, 谢应文. 滇西洱海东第三纪超 K 质火成岩系的 Nd-Sr-Pb 同位素特征与西南大陆地幔演化[J]. 地球化学, 1992(3): 201-212.
- [9] 黄智龙, 王联魁, 朱成明. 云南马厂箐金矿区煌斑岩地球化学及成因探讨[J]. 矿物岩石, 1996(2): 82-89.
- [10] 邱检生, 王德滋, 曾家湖. 鲁西中生代富钾火山岩及煌斑岩微量元素和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. 高校地质学报, 1997(4): 384-395.
- [11] 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞, 钟宏, 曹建劲, 等. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 9447-958.
- [12] 马铁球, 陈俊, 郭乐群, 柏道远, 何江南. 湘东北临湘地区钾质煌斑岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及其地球化学特征[J]. 中国地质, 2010, 37(1): 56-63.
- [13] 王登红, 陈振宇, 许建祥, 刘善宝. 赣南路迳似金伯利岩(金伯利质煌斑岩)锆石的特点和年龄及其构造意义[J]. 岩矿测试, 2012, 31(4): 705-710.
- [14] 孔华, 全铁军, 奚小双, 钟江临, 陈泽峰, 王高, 等. 湖南宝山矿区煌斑岩的地球化学特征及地质意义[J]. 中国有色金属学报, 2013(9): 2671-2682.
- [15] 贾丽琼, 莫宣学, 董国臣, 徐文艺, 王梁, 郭晓东, 等. 滇西马厂箐煌斑岩成因: 地球化学、年代学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1247-1260.
- [16] 陈福川, 王庆飞, 李龚健, 赵岩. 滇西哀牢山镇沉煌斑岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学和地球化学特征[J]. 岩石学报, 2015, 31(11):3203-3216.
- [17] 胡阿香, 彭建堂. 湘中锡矿山中生代煌斑岩及其成因研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(7): 2041-2056.
- [18] 翟淳. 论煌斑岩的成因模式[J]. 地质论评, 1981, 27(6): 528-532.
- [19] Bernard-Griffiths, J., Fourcade, S. and Kupuy, C. (1991) Isotopic Study (Sr, Nd, O and C) of Lamprophyres and Associated Dykes from Tamazert (Morocco): Crustal Contamination Processes and Source Characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, **103**, 190-199. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90160-J](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90160-J)
- [20] Currie, K.L. and Williamms, P.R. (1993) An Archean Calc-Alkaline Lamprophyre Suite, Northeastern Yilgarn Block, Western Australia. *Lithos*, **31**, 33-50. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(93\)90031-7](https://doi.org/10.1016/0024-4937(93)90031-7)

- [21] 丁清峰. 煌斑岩及其与金矿关系研究的进展[J]. 世界地质, 2001, 20(1):17-24.
- [22] 符德贵, 周云满, 张长青, 陈庆广, 覃修平. 滇中小水井金矿煌斑岩特征及与金矿化的关系[J]. 地质与勘探, 2010, 46(3): 414-425.
- [23] 张惠华, 代堰镭, 胡智丹, 周清, 李同柱, 沈战武, 等. 川西江浪穹窿煌斑岩地球化学特征及锆石 U-Pb 定年[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(4): 663-673.
- [24] 谢桂青, 彭建堂, 胡忠瑞, 贾大成. 湖南锡矿山铋矿矿区煌斑岩的地球化学特征[J]. 岩石学报, 2001, 17(4):629-636.
- [25] 张勇, 陈斌, 邵济安, 翟明国. 华北太行晚中生代煌斑岩地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(1): 29-33.
- [26] 鹿坤, 冯佐海, 侯读杰, 李晓峰. 桂东北煌斑岩源区成分模拟[J]. 矿业快报, 2008, 24(12): 50-52.
- [27] 蒋丽怡, 付宇, 周浩阳, 王从明, 吕庆松, 孙晓明. 滇西北衙金多金属矿区煌斑岩主微量元素地球化学特征[J]. 矿床地质, 2014(s1): 405-406.
- [28] 贾大成, 胡瑞忠, 谢桂青. 湘东北中生代基性岩脉岩石地球化学及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(2): 179-184.
- [29] 王磊, 金鑫鏢, 王新宇, 吴祥珂, 刘重芄, 段桂玲. 桂北罗城垌洞煌斑岩形成过程: 地球化学、年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素制约[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 10-19.
- [30] 曹华文, 裴秋明, 张寿庭, 王长明, 王光凯, 王亮. 个旧老厂钾质煌斑岩矿物学特征及其锆石 U-Pb 和黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄[J]. 地球化学, 2016, 45(6): 545-568.
- [31] 袁和, 罗先熔, 李武毅, 陈武. 西藏古堆地区煌斑岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质与勘探, 2017, 53(2): 300-309.
- [32] 张朋, 陈冬, 赵岩, 寇林林, 杨宏智, 王希今, 等. 辽宁榛子沟铅锌矿煌斑岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3): 636-647.
- [33] 饶家荣, 肖海云, 刘耀荣, 柏道远, 邓延林. 扬子、华夏古板块会聚带在湖南的位置[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 484-502.
- [34] 杨金豹, 赵志丹, 莫宣学, 盛丹, 丁聪, 王丽丽, 等. 湖南道县虎子岩碱性玄武岩及其基性捕虏体成因和地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(5): 1421-1432.
- [35] 孔华, 金振民, 林源贤. 道县玄武岩中麻粒岩包体的岩石学及年代学[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(2): 115-119.
- [36] 李昌年, 钟称生, 王方正, 刘春芳. 桂北-湘南中生代玄武质岩石及其深源包体的地球化学性质和岩石成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 20(2): 418-431.
- [37] 刘耀荣, 彭学军, 马爱军, 等. 湖南 1:25 万道县幅区域地质调查报告[R]. 长沙: 湖南省地质调查院, 2004.
- [38] Rock, N.M.S., Bowes, D.R., Wright, A.E. (1991) Lamprophyres. Blackie, Glasgow, 1-285.
- [39] 路凤香, 舒小辛, 赵崇贺. 有关煌斑岩分类的建议[J]. 地质科技情报, 1991(s1): 55-62.
- [40] Lefebvre, N., Kopylova, M. and Kivi, K. (2005) Archean Calc-Alkaline Lamprophyres of Wawa, Ontario, Canada: Unconventional Diamondiferous Volcaniclastic Rocks. *Precambrian Research*, **138**, 57-87. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.04.005>
- [41] Rock, N.M.S. (1990) Lamprophyres. Blackie, Glasgow and London, 77-156.
- [42] Langmuir, C.H., Vocke Jr., R.D., Hanson, G.N. and Hart, S.R. (1978) A General Mixing Equation with Applications to Icelandic Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, **37**, 380-392. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90053-5)
- [43] Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J., Eds., *Magmatism in the Ocean Basins*, Vol. 42, Geological Society, London, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- [44] Mllnker, C. (1998) Nb/Ta Fractionation in a Cambrian Arc/Back System, New Zealand: Source Constraints and Application of Refined ICPMS Techniques. *Chemical Geology*, **144**, 23-45. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00105-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00105-8)
- [45] Ormerod, D.S., Hawkesworth, C.J., Rogers, N.W., Leeman, W.P. and Menzies, M.A. (1988) Tectonic and Magmatic Transitions in the Western Great Basin. *Nature*, **333**, 349-353. <https://doi.org/10.1038/333349a0>
- [46] Roeder, P.L. and Emslie, R.F. (1970) Olivine-Liquid Equilibrium. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, **29**, 275-289. <https://doi.org/10.1007/BF00371276>

- [47] Rudnick, R.L. and Gao, S. (2014) Composition of the Continental Crust. In: Holland, H.D. and Turekian, K.K., Treatise on Geochemistry. 2nd Edition, Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- [48] 陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 地球化学[M]. 第2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 163-218.
- [49] Ma, L., Jiang, S.Y., Hou, M.L., Dai, B.-Z., Jiang, Y.-H., Yang, T., *et al.* (2014) Geochemistry of Early Cretaceous Calc-Alkaline Lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implication for Lithospheric Evolution of the Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, **25**, 859-872. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.012>
- [50] Frey, F.A., Green, D.H. and Roy, S.D. (1978) Integrates Models of Basalt Petrogenesis: A Study of Quartz Tholeiites to Olivine Melilitites from South Eastern Australia Utilizing Geochemical and Experimental Petrological Data. *Journal of Petrology*, **19**, 463-513. <https://doi.org/10.1093/petrology/19.3.463>
- [51] Pearce, J.A. and Norry, M.J. (1979) Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, **69**, 33-47. <https://doi.org/10.1007/BF00375192>
- [52] Meschede, M. (1986) A Method of Discriminating between Different Types of Mid-Ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb-Zr-Y Diagram. *Chemical Geology*, **56**, 207-218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90004-5)
- [53] Rogers, N.W. (1992) Potassic Magmatism as a Key to Trace-Element Enrichment Processes in the Upper Mantle. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **50**, 85-99. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90038-F](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90038-F)
- [54] 盛丹, 陈剑锋, 陈小兰, 符金豪. 湖南道县虎子岩地区二长花岗岩的锆石 U-Pb 年代学特征、地球化学特征及其地质意义[J]. 国土资源导刊, 2015(3): 1-8.
- [55] Dai, B.Z., Jiang, S.Y., Jiang, Y.H., Zhao, K.-Do. and Liu, D.-Y. (2008) Geochronology, Geochemistry and Hf-Sr-Nd Isotopic Compositions of Huziyan Mafic Xenoliths, Southern Hunan Province, South China: Petrogenesis and Implications for Lower Crust Evolution. *Lithos*, **102**, 65-87. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.08.010>
- [56] 郭锋, 范蔚茗, 林舸, 林源贤. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨[J]. 科学通报, 1997, 42(15): 1661-1664. <https://doi.org/10.1360/csb1997-42-15-1661>
- [57] Li, X.H., Chung, S.L., Zhou, H.W., Lo, C.-H., Liu, Y. and Chen, C.-H. (2004) Jurassic Intraplate Magmatism in Southern Hunan-Eastern Guangxi: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating, Geochemistry, Sr-Nd Isotopes and Implications for the Tectonic Evolution of SE China. *Geological Society, London, Special Publications*, **226**, 193-215. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.226.01.11>