

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*

杨金豹¹ 赵志丹^{1**} 莫宣学¹ 盛丹² 丁聪¹ 王丽丽¹ 侯青叶¹ 李红进³

YANG JinBao¹, ZHAO ZhiDan^{1**}, MO XuanXue¹, SHENG Dan², DING Cong¹, WANG LiLi¹, HOU QingYe¹ and LI HongJin³

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 湖南省国土资源规划院, 长沙 410007

3. 延长石油集团研究院, 西安 710077

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Hunan Land and Resources Planning Institute, Changsha 410007, China

3. Research Institute of Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China

2014-04-29 收稿, 2015-01-20 改回.

Yang JB, Zhao ZD, Mo XX, Sheng D, Ding C, Wang LL, Hou QY and Li HJ. 2015. Petrogenesis and implications for alkali olivine basalts and its basic xenoliths from Huziyan in Dao County, Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1421–1432

Abstract We collected alkali basalts, gabbro xenoliths and basic granulite xenoliths from Huziyan, Hunan Province. The alkali basalts contain 10% ~ 15% phenocrysts of olivine, with high K₂O content (2.88% ~ 3.51%) and high Mg[#] values and OIB-like REE compositions ((La/Yb)_N = 16 ~ 26). They have relatively homogeneous and negative ε_{Nd}(t) values, and the tendency toward to EM II end member, which indicate that it is derived from an enriched mantle partial melting under the extensional tectonic setting. Their high O isotopic values (7.8‰ ~ 11.0‰) maybe resulted from the contamination of carbonate rock after the ascent of magma or due to posterior weathering alteration. The olivine gabbro xenoliths slightly enriched LREE ((La/Yb)_N = 2.5 ~ 3.0) have almost subtle Eu anomaly (δEu = 1.03 ~ 1.06), with Sr-Nd isotopic composition close to that of the EM II end member. Their ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios, ε_{Nd}(t) values, and Nd model ages are lower than the above basalts, which suggest that the olivine gabbro is formed by the local crystallization of previous basaltic magma before reaching the surface. The basic granulite xenoliths have high Eu anomaly (δEu = 1.42 ~ 4.41) and are grouped under HREE content, and strongly depleted in U, Th and HFSEs (Nb, Ta, Zr, Hf and Ti). Meanwhile, their Sr-Nd isotopic composition indicate that they are typified of crust-mantle mixing signature. The processes of magmatic origin and evolution are relevant to the tectonic setting transformation in the eastern of South China, which was controlled by the subduction of Paleo-Pacific slab.

Key words Alkali basalts; Basic granulite xenoliths; Enriched mantle; Tectonic setting; South China

摘要 本文在湖南道县虎子岩地区采集了碱性玄武岩、橄辉长岩和基性麻粒岩捕虏体。碱性玄武岩的斑晶为橄辉石(10% ~ 15%), 岩石 K₂O 含量为 2.88% ~ 3.51%, Mg[#] 值为 80, 具有洋岛玄武岩的微量元素特征, 岩石具有富集的氧同位素组成(7.8‰ ~ 11.0‰), 可能是其上升到地表后由碳酸盐岩组分的加入及后期风化蚀变作用造成的, 其相对均一且为负的 ε_{Nd}(t) 值和靠近 EM II 地幔端员的特点, 指示了该玄武岩是拉张构造环境下富集地幔部分熔融的产物。橄辉长岩具有弱富集的 LREE (La/Yb)_N = 2.5 ~ 3.0、弱的 Eu 正异常 (δEu = 1.03 ~ 1.06), 其 Sr-Nd 同位素组成更接近 EM II 地幔端员, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值、ε_{Nd}(t) 值及 Nd 模式年龄均高于碱性玄武岩, 说明橄辉长岩是先形成的上述玄武岩浆在未达到地表之前局部发生结晶作用后形成的。基性麻粒岩捕虏体具较强的正 Eu 异常 (δEu = 1.42 ~ 4.41), 其重稀土元素含量出现明显的分组特征, 强烈亏损

* 本文受深部探测技术与实验研究专项课题 (Sinoprobe-04-02)、科技部国际合作基金 (2011DFA22460) 和 111 计划 (B07011) 联合资助。

第一作者简介: 杨金豹, 男, 1985 年生, 博士生, 岩石学专业, E-mail: eric.yang19850706@gmail.com

** 通讯作者: 赵志丹, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 岩石学和地球化学专业, E-mail: zdzhao@cugb.edu.cn

U、Th 和 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素,同时 Sr-Nd 同位素组成显示其具有壳幔混合的特征。本文结合已有研究结果,探讨了岩浆起源和演化,以及与古太平洋板片俯冲有关的构造环境转换。

关键词 碱性玄武岩;基性麻粒岩捕虏体;富集地幔;构造环境;华南

中图分类号 P588. 124; P588. 145; P588. 347

1 引言

由于下地壳是人类无法直接接触的部分,且下地壳和上地幔之间持续发生物质和能量的交换,所以研究下地壳的物质组成、起源和演化就十分重要 (Rudnick, 1992; Rudnick and Gao, 2004)。目前研究深部地壳的方法主要有以下三种,一是研究地表出露的角闪岩相和麻粒岩相高级变质岩露头 (Bohlen and Mezger, 1989);二是研究被快速上升的岩浆带到地表的麻粒岩相下地壳捕虏体 (Rudnick, 1992; Yu *et al.*, 2003a, b; Zheng *et al.*, 2003, 2004a);三是通过地球物理 (Christensen and Mooney, 1995; Holbrook *et al.*, 1992; Rudnick and Fountain, 1995; Smithson, 1978) 和地表热流的研究 (Rudnick and Gao, 2004) 来推测深部地壳组成,其中前两种方法可直接获得样品。通过研究下地壳捕虏体,可以为不同时期、不同构造背景下岩石圈演化提供重要的约束,例如在华北克拉通的研究 (Zheng *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2004)、华南新生代下地壳捕虏体 (于津海等, 2002; Yu *et al.*, 2003a, b) 及元古代花岗岩中麻粒岩包体 (徐德明等, 2007; 杜杨松等, 1999) 的研究。而对华南中生代玄武质岩浆作用及其携带的下地壳捕虏体的研究为数不多,主要集中在湖南道县虎子岩地区,该区发现大量上地幔和下地壳捕虏体 (Li *et al.*, 2004; Dai *et al.*, 2008; 李昌年等, 2001; 王方正等, 1997)。虎子岩玄武岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 152 ~ 147Ma (Li *et al.*, 2004),下地壳基性麻粒岩捕虏体的年龄为 250 ~ 200Ma (Dai *et al.*, 2008; 郭锋等, 1997),二者代表中生代华南岩石圈及构造演化的产物,相应的研究成果为华南下地壳组成、壳幔相互作用及构造演化提供了重要约束。本文在道县虎子岩野外地质和室内岩相学研究的基础上,对虎子岩玄武岩及其携带的橄榄辉长岩和基性麻粒岩捕虏体进行了元素和 Sr-Nd-O 同位素地球化学研究,并结合前人在华南东部地区的研究成果,进一步揭示了华夏板块中生代玄武岩和捕虏体的成因及地球动力学意义。

2 地质背景和样品

华南板块由扬子板块和华夏板块碰撞形成,碰撞开始时间约 1000 ~ 950Ma,大约在 770 ~ 800Ma 以前完成拼接 (Charvet *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2002);早古生代时期,华南发生了强烈的构造-热事件,导致巨厚沉积物被抬升,并在古老变质基底上形成加里东褶皱造山带,变形峰期为 420 ~

400Ma,岩浆活动峰期为 430 ~ 400Ma (舒良树, 2006);中生代华南板块的构造体制发生了转变,由印支期特提斯构造域向燕山晚期太平洋构造域转换,特提斯构造域表现为陆陆碰撞造山挤压环境,而太平洋构造域表现为板内拉张环境,构造域的转换使得华南东部地区发育大面积中生代花岗岩和火山岩 (Zhou *et al.*, 2006);新生代时期,沿海地区发生小面积玄武岩浆喷发,东南沿海地区由晚中生代火山弧构造环境转换为新生代板内裂谷构造环境 (徐夕生和谢昕, 2005)。按照传统观点,华南板块以江山-绍兴-萍乡断裂为界划分为北面的扬子板块和南面的华夏板块 (车自成等, 2002),沿该断裂附近,在西堽、新昌和道县的玄武岩中都出露有下地壳捕虏体。在华夏板块内发育三条 NE-SW 向断裂,即宁远-江华断裂、广昌-寻乌断裂和长乐-南澳断裂 (图 1a)。大面积的花岗岩类主要分布在宁远-江华断裂以东地区,火山岩主要分布在广昌-寻乌断裂以东的沿海地区,并且沿 NE 向呈带状分布,火成岩从内陆向沿海有变年轻的趋势 (Zhou *et al.*, 2006; 孙涛, 2006)。

本文研究区位于湘南道县县城以东约 2km 的虎子岩村,该区广泛发育上泥盆统到下石炭统沉积地层,虎子岩岩体出露在上泥盆统锡矿山组上段和下石炭统岩关阶下段灰岩、泥灰岩和泥岩沉积地层中,其东西各有一条断裂发育;该岩体出露的面积约 0.1km²,走向近东西呈反“S”形展布 (图 1b)。虎子岩岩体主要为超浅成-喷出相 (辉绿岩) 的玄武岩小岩株,呈筒状产出,风化较为严重,含有椭球状橄榄辉长岩和基性麻粒岩捕虏体 (图 1c) 以及灰岩角砾和玻璃质团块 (图 1d)。野外采集寄主玄武质火山岩样品 5 件 (HZY02、09、17、20、22),辉长岩捕虏体 12 件,其中 HZY12、13、14 为橄榄辉长岩,其余为基性麻粒岩捕虏体,采样点 GPS 坐标为 N 25°31' 7.47", E 11°37' 2.20"。

玄武岩中的斑晶为橄榄石,含量 10% ~ 15%,橄榄石具有类似环带的扭折带 (Kink band),是矿物塑性变形的标志 (图 2a 左上),并具有碎裂及熔蚀边结构 (图 2b 中,图 2d 右下),此外还具有连晶现象 (图 2a 右下),并含有少量金云母 (图 2c);基质主要为细小柱状基性长石、单斜辉石及橄榄石组成,局部发生蚀变。橄榄辉长岩的主要矿物组成有橄榄石 (~5%)、单斜辉石 (40% ~ 45%)、斜长石 (45% ~ 50%) 和少量斜方辉石 (5%) 及金云母 (1%),并且橄榄石具有碎裂结构,部分辉石发生蚀变 (图 2e)。基性麻粒岩捕虏体中辉石 (35% ~ 45%) 堆积成条带状,其粒径一般要小于斜长石 (55% ~ 65%),并且在辉石和斜长石颗粒边界形成平直、夹角为 120 度的镶嵌粒状平衡结构 (图 2f-h);所有的捕虏体都有尖晶石出现,多数呈蠕虫状包裹在辉石内部 (少数为颗粒

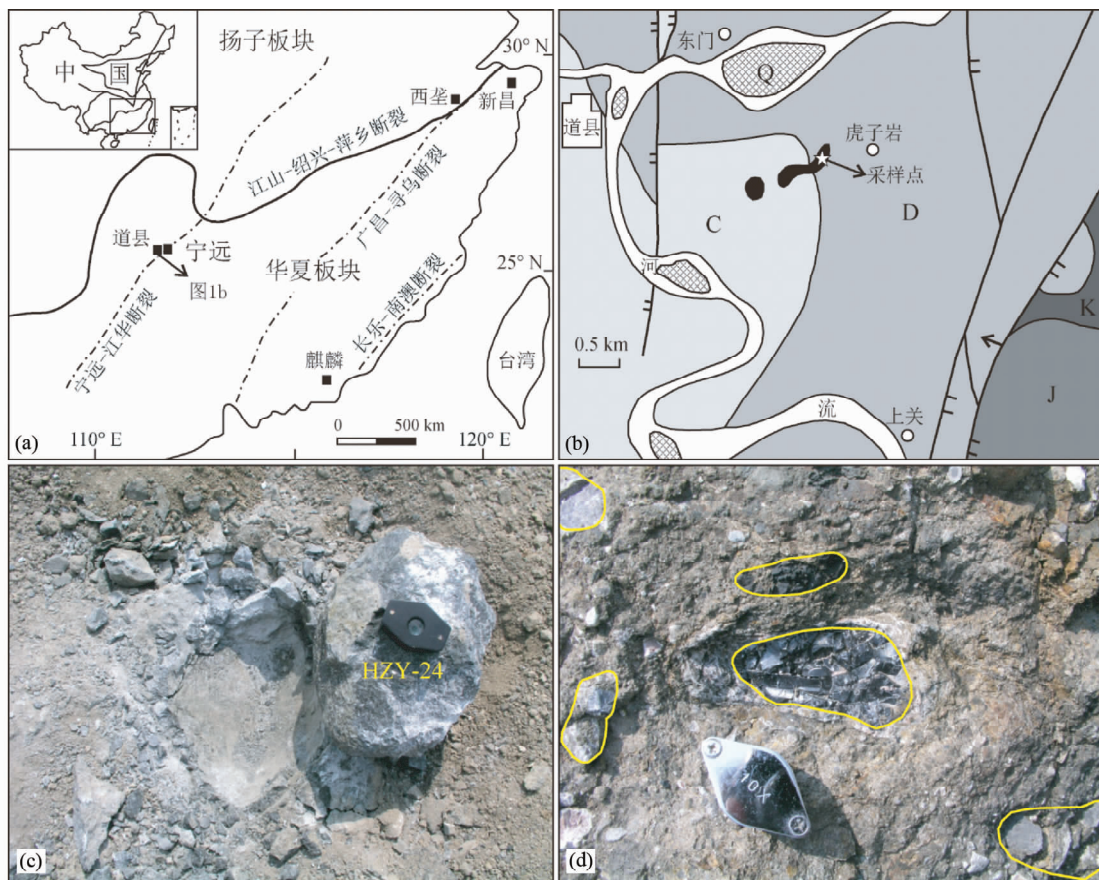


图1 道县虎子岩地区地质简图及野外照片

(a) 华南地质构造单元划分简图(据 Zheng *et al.*, 2004b; 朱介寿等, 2005 绘制); (b) 虎子岩地区地质简图(湖南地质调查研究院, 2000^①); (c) 基性麻粒岩捕虏体; (d) 灰岩角砾(左和右下)和玻璃质团块(中). Q-第四系沉积物; K-白垩系砂页岩、砂、砾岩; J-侏罗系砂、砾岩; C-石炭系泥岩、灰岩; D-泥盆系泥质灰岩、泥灰岩

Fig. 1 Geological sketch map and field outcrop photos of basalt and enclaves in Huziyan area, Daoxian

状), 含有尖晶石的辉石具文象结构(图 2h), 这种现象说明基性麻粒岩是下地壳辉长岩在麻粒岩相变质作用中形成的, 尖晶石代替石榴石出现在岩石中意味着其是石榴石退变质的产物。

3 分析方法

3.1 样品处理流程

样品无污染破碎和单矿物挑选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。首先将所选新鲜样品去除风化面和表面污渍后低温(50℃)烘干 24h, 再将样品碎成小块并手工去除岩石中可见的杏仁体, 最后将小块样品磨至 200 目。锆石则是将样品反复破碎至 80 目, 经手工淘洗、强磁分选、电磁分选、重液分选和双目镜下手工挑选等一系列过程挑选出的。

3.2 主、微量元素及同位素测试

全岩主量元素在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)用 Leeman Labs. Inc 公司 Prodigy 型全谱直读型发射光谱仪(ICP-AES)测定, 测定精度优于 5%。微量元素在中国地质大学(武汉)GPMR 用 ICP-MS(Agilent 7500)测定, 测试精度优于 5%~10%。测试过程中采用内标和外标综合控制测试质量的方法, 同时测定空白样、USGS 国际标准物质 AGV-2、BHVO-2、BCR-2 和 GSR-1 以及实验室内标 In, 样品制备的具体流程、仪器分析精密度和准确度见 Gao *et al.* (2002)。氧同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所利用德国 Finnigan 公司 MAT 253 型稳定同位素质谱仪测定, 分析精度为 ±2‰。Sr-Nd 同位素测试在中国地质大学(武汉)GPMR 采用 Nu Plasma 多接收等离子体质谱仪测定, Sr 和 Nd 同位素的分馏校正分别采用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr

① 湖南地质调查研究院. 2000. 1:20 万道县幅地质图

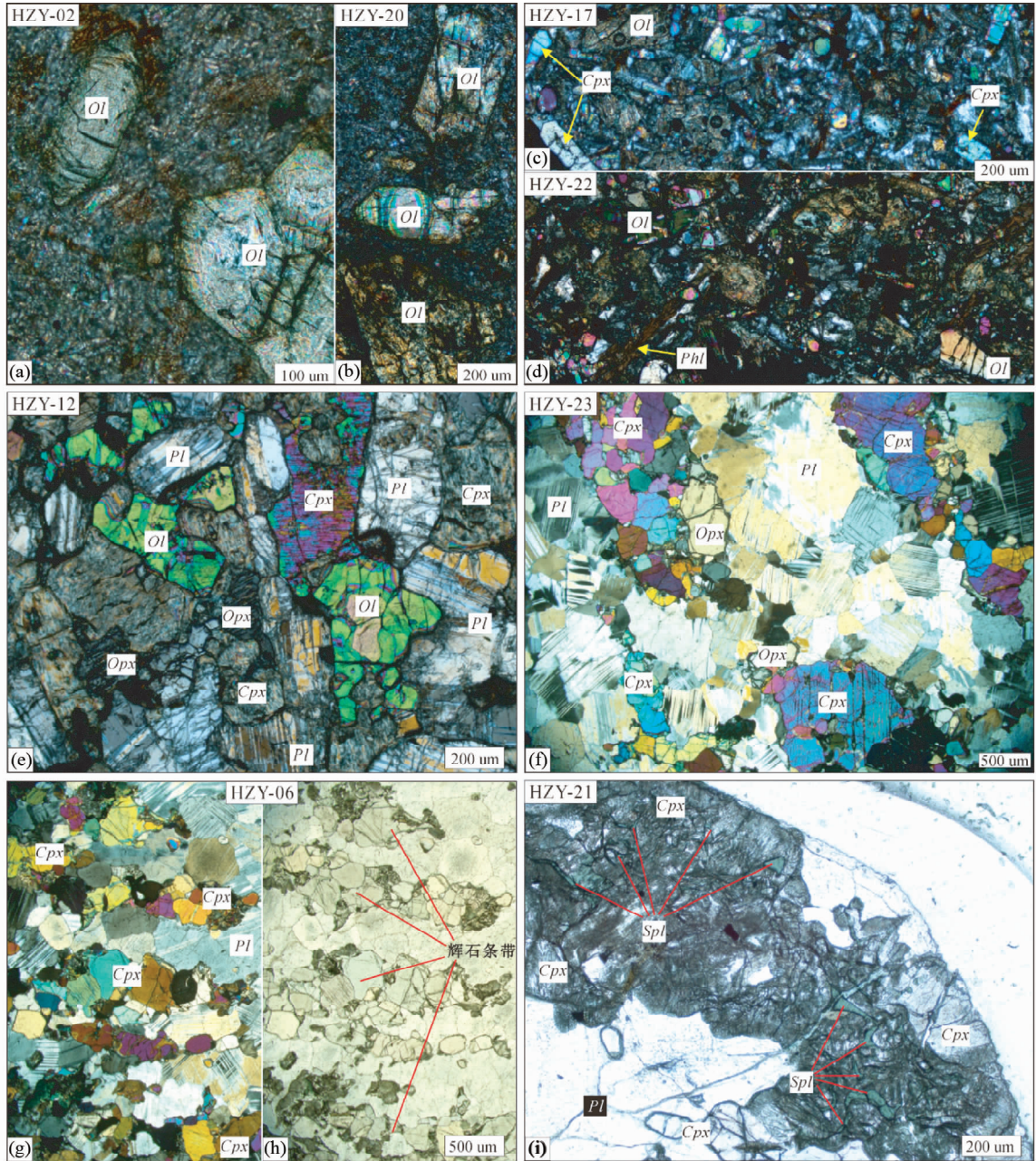


图2 道县虎子岩地区岩石显微照片

(a, b) 玄武岩, 橄榄石斑晶发育扭折带和熔蚀边, 正交偏光; (c, d) 玄武岩, 蚀变比(a, b)弱, 正交偏光; (e) 橄榄辉长岩, 正交偏光; (f-h) 基性麻粒岩, 具辉石条带和平衡的镶嵌粒状平衡结构, (f) 和 (g) 正交偏光, (h) 单偏光; (i) 基性麻粒岩, 辉石内有蠕虫状尖晶石, 单偏光. Cpx-单斜辉石; Ol-橄榄石; Opx-斜方辉石; Phl-金云母; Pl-斜长石; Spl-尖晶石

Fig. 2 Photomicrographs of the microstructure of the rocks from Huziyuan area, Daoxian

= 0.1194 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 。分析期间, JMC 标准 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值的平均值为 $0.511937 \pm 10(2\sigma)$; BCR-1 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值的平均值为 $0.512594 \pm 10(2\sigma)$ 。NBS987 标准 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值的平均值为 $0.710217 \pm 11(2\sigma)$ 。分析流程见 Zhang *et al.* (2002)。主、微量元素及同位素测试结果见表 1。

4 分析结果

4.1 主量元素

所有样品在 TAS 图解上均为玄武质岩石(图 3a)。5 件玄武岩具有富 MgO(14.84% ~ 16.54%)、富 K_2O (2.88% ~ 3.51%) 特征, 属于钾玄武岩系列的碱性橄榄玄武岩(图 3b);

表 1 道县虎子岩玄武岩及基性捕虏体的全岩主量 (wt%)、微量 ($\times 10^{-6}$) 元素、CIPW 计算和 Sr-Nd-O 同位素数据

Table 1 Bulk-rock major element (wt%), trace element ($\times 10^{-6}$), CIPW norm minerals, and Sr-Nd-O isotopes of the basalt and its gabbro and granulite xenoliths from Huziyan area, Daoxian

样品号	HZY01	HZY02	HZY05	HZY06	HZY07	HZY09	HZY12	HZY13	HZY14	HZY15	HZY17	HZY18	HZY20	HZY21	HZY22	HZY23	HZY24
岩性	麻粒岩	玄武岩	麻粒岩	麻粒岩	麻粒岩	玄武岩	橄榄辉长岩	橄榄辉长岩	橄榄辉长岩	麻粒岩	玄武岩	麻粒岩	玄武岩	麻粒岩	玄武岩	麻粒岩	麻粒岩
SiO ₂	45.96	48.08	49.62	48.92	50.26	47.54	45.59	47.14	47.06	47.46	47.83	48.62	46.45	48.18	48.07	51.06	50.24
TiO ₂	1.12	0.62	0.13	0.33	0.13	0.63	0.77	0.75	0.72	0.30	0.69	0.09	0.63	0.22	0.69	0.22	0.20
Al ₂ O ₃	16.21	8.57	23.78	14.52	24.12	8.71	17.20	15.77	16.06	19.14	10.44	22.18	9.49	17.92	10.70	21.77	21.06
Fe ₂ O ₃	8.32	7.43	3.51	7.47	3.47	7.51	6.41	7.23	7.14	7.10	8.00	5.03	7.53	6.19	7.98	3.01	4.08
MnO	0.24	0.16	0.06	0.14	0.06	0.17	0.14	0.18	0.17	0.13	0.16	0.07	0.17	0.11	0.16	0.06	0.07
MgO	13.00	15.15	5.98	13.73	5.88	15.58	14.26	12.73	12.32	11.32	16.54	9.03	14.84	11.33	15.91	6.31	7.94
CaO	8.55	11.30	10.51	11.82	10.94	11.62	6.82	8.52	8.69	8.64	6.74	9.95	12.51	10.35	6.30	12.63	10.96
Na ₂ O	2.01	0.32	3.32	1.80	3.45	0.31	1.90	1.79	1.87	2.68	0.89	2.99	0.38	2.32	0.93	3.18	2.92
K ₂ O	0.57	3.51	0.87	0.12	0.58	3.46	0.50	1.51	1.77	0.41	3.19	0.23	2.88	0.18	3.40	0.22	0.25
P ₂ O ₅	0.04	0.63	0.04	0.04	0.04	0.62	0.08	0.07	0.09	0.04	0.46	0.04	0.56	0.04	0.44	0.04	0.05
LOI	4.66	3.62	1.82	1.37	1.21	3.77	5.67	4.48	4.48	2.13	4.85	2.17	3.77	2.62	4.88	0.63	1.59
Total	100.70	99.39	99.63	100.27	100.15	99.91	99.33	100.15	100.36	99.34	99.79	100.40	99.20	99.49	99.46	99.14	99.37
K ₂ O/Na ₂ O	0.28	11.07	0.26	0.07	0.17	11.13	0.27	0.84	0.95	0.15	3.58	0.08	7.66	0.08	3.67	0.07	0.09
Mg [#]	76	80	77	78	77	80	82	78	77	76	80	78	80	78	80	81	79
Pl	52.89	14.23	73.67	47.12	76.79	12.50	52.93	47.73	48.00	63.72	23.34	73.21	15.75	59.80	23.66	72.53	70.05
Or	3.76	23.07	6.49	0.84	4.14	22.73	3.34	9.85	11.43	2.63	20.93	1.56	18.54	1.14	22.36	1.37	1.61
Ne	—	—	1.60	—	0.89	1.17	—	—	—	—	—	—	1.79	—	—	—	—
C	—	—	—	—	—	—	1.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Le	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.59	—	—	—	—
Di	7.43	34.38	4.35	22.23	4.82	35.19	—	9.83	10.70	3.14	13.40	2.37	36.61	10.86	11.90	14.59	8.68
Hy	9.61	1.23	—	10.93	—	—	21.38	8.09	2.84	5.63	13.55	3.36	—	10.75	14.87	3.72	10.01
Ol	22.67	22.89	13.02	16.91	12.47	24.23	18.04	21.67	24.21	23.10	24.66	18.48	22.68	15.92	23.16	6.64	8.43
Ilm	2.22	1.23	0.25	0.65	0.27	1.25	1.56	1.50	1.44	0.59	1.37	0.17	1.25	0.44	1.39	0.42	0.40
Mt	1.26	1.13	0.52	1.10	0.51	1.13	1.00	1.10	1.09	1.06	1.22	0.74	1.15	0.93	1.23	0.45	0.61
Ap	0.09	1.53	0.09	0.09	0.09	1.48	0.21	0.16	0.21	0.09	1.14	0.09	1.37	0.09	1.07	0.09	0.12
Zir	0.01	0.01	—	—	—	0.01	0.01	0.01	0.01	—	—	—	0.01	—	0.01	—	—
Chr	0.03	0.28	0.03	0.13	0.03	0.27	0.13	0.04	0.04	0.01	0.37	0.01	0.21	0.06	0.34	0.16	0.09
Total	99.97	99.98	100.02	100.00	100.01	99.96	99.98	99.98	99.97	99.97	99.99	99.99	99.95	99.99	99.99	99.97	100.00
Li	48.9	33.8	19.5	14.1	13.8	36.0	64.4	47.2	47.6	27.9	35.2	25.6	33.8	25.4	35.0	7.6	23.0
Be	1.6	2.3	0.2	0.6	0.2	2.2	2.1	1.9	2.1	1.2	1.9	1.2	2.4	1.5	1.9	0.2	0.8
Sc	35.2	21.9	5.9	36.5	6.3	22.4	27.0	39.4	39.8	10.9	27.3	5.0	17.6	18.9	25.5	19.3	16.6
V	219	158	31	154	32	162	206	314	322	53	173	22	142	82	168	100	85
Cr	140	1241	132	602	139	1215	597	188	189	75	1596	45	909	252	1485	733	401
Co	45	53	25	57	24	54	25	32	30	51	52	51	44	61	52	17	32
Ni	86	706	140	311	135	692	156	73	66	213	587	272	556	265	534	118	166
Cu	29	70	49	113	46	72	40	17	16	55	65	25	71	46	67	46	52
Zn	44	69	20	39	20	68	46	38	39	45	63	34	64	50	64	11	20
Ga	14.4	9.8	13.4	9.2	13.0	9.6	11.0	12.3	13.3	12.4	10.8	10.8	9.4	9.8	11.6	10.6	11.2
Rb	7	43	27	3	16	40	12	22	26	10	81	4	34	4	88	5	4

续表 1

Continued Table 1

样品号 岩性	HZY01 麻粒岩	HZY02 玄武岩	HZY05 麻粒岩	HZY06 麻粒岩	HZY07 麻粒岩	HZY09 玄武岩	HZY12 橄榄辉长岩	HZY13 橄榄辉长岩	HZY14 橄榄辉长岩	HZY15 麻粒岩	HZY17 玄武岩	HZY18 麻粒岩	HZY20 玄武岩	HZY21 麻粒岩	HZY22 玄武岩	HZY23 麻粒岩	HZY24 麻粒岩
Sr	276	870	667	238	544	976	211	566	725	349	419	424	1262	352	454	396	363
Y	27.0	25.1	2.5	11.5	2.3	25.7	18.4	20.1	20.8	7.5	23.5	4.1	23.4	8.4	22.7	6.1	7.2
Zr	40	97	4	12	3	97	41	58	48	19	86	2	96	7	91	7	8
Nb	1.4	8.9	0.1	0.1	0.0	9.2	2.9	2.7	2.9	0.1	9.0	0.0	10.1	0.0	9.3	0.0	0.1
Cs	1.85	5.28	8.94	2.37	3.75	10.21	1.28	1.79	2.76	3.94	9.05	2.28	11.59	3.24	9.59	1.27	1.50
Ba	226	1642	1466	64	836	1748	185	582	515	168	1217	150	1711	90	1237	111	92
La	4.1	55.4	2.1	1.3	1.6	55.4	6.4	6.3	6.6	3.4	40.0	1.3	53.0	1.6	41.5	0.8	2.0
Ce	12	105	4	3	3	108	15	16	16	7	79	3	103	4	81	2	5
Pr	2.2	12.9	0.5	0.6	0.4	13.0	2.2	2.3	2.4	1.0	9.4	0.4	11.9	0.7	9.4	0.3	0.7
Nd	12	51	2	4	2	52	10	11	11	5	37	2	47	4	37	2	3
Sm	4.3	10.8	0.5	1.3	0.4	11.3	2.9	3.0	3.1	1.2	7.7	0.7	9.7	1.2	8.0	0.6	1.0
Eu	1.32	3.08	0.72	0.53	0.60	3.06	1.06	1.10	1.18	0.65	2.22	0.50	2.67	0.64	2.15	0.44	0.59
Gd	4.9	9.4	0.5	1.7	0.4	9.6	3.2	3.4	3.6	1.4	7.1	0.8	8.6	1.5	7.0	0.9	1.3
Tb	0.82	1.18	0.07	0.32	0.07	1.18	0.57	0.61	0.64	0.22	0.91	0.14	1.05	0.26	0.89	0.16	0.21
Dy	5.0	5.5	0.4	2.0	0.5	5.4	3.4	3.6	3.7	1.3	4.6	0.7	4.9	1.4	4.5	1.0	1.3
Ho	0.91	0.85	0.09	0.41	0.08	0.90	0.68	0.69	0.72	0.24	0.82	0.11	0.82	0.27	0.77	0.22	0.24
Er	2.49	2.04	0.23	1.17	0.25	2.09	1.70	1.95	1.98	0.69	1.94	0.30	1.95	0.76	1.91	0.67	0.66
Tm	0.36	0.28	0.04	0.18	0.03	0.28	0.24	0.29	0.29	0.10	0.27	0.04	0.28	0.11	0.26	0.11	0.10
Yb	2.01	1.45	0.21	1.00	0.19	1.54	1.44	1.72	1.76	0.60	1.70	0.19	1.53	0.61	1.63	0.57	0.56
Lu	0.30	0.23	0.03	0.15	0.03	0.24	0.22	0.24	0.24	0.08	0.25	0.03	0.22	0.08	0.23	0.08	0.08
Hf	1.7	2.3	0.1	0.5	0.1	2.4	1.3	1.5	1.3	0.6	2.3	0.1	2.3	0.3	2.4	0.3	0.3
Ta	0.13	0.52	0.01	0.03	0.01	0.52	0.23	0.20	0.20	0.02	0.55	0.02	0.57	0.01	0.57	0.02	0.02
Pb	3	19	2	2	1	20	4	3	3	3	15	1	20	1	17	1	2
Th	0.0	11.2	0.1	0.0	0.0	11.3	1.1	0.8	0.6	0.0	8.6	0.0	12.3	0.0	9.0	0.0	0.1
U	0.01	3.94	0.05	0.01	0.01	4.06	0.32	0.33	0.24	0.01	2.81	0.01	4.50	0.01	3.03	0.01	0.01
Nb/Ta	10.90	17.14	9.58	1.68	5.31	17.85	12.79	14.06	14.28	4.46	16.32	2.50	17.59	1.69	16.31	3.11	8.75
Zr/Hf	22.76	42.88	31.14	25.12	27.61	40.78	32.76	38.34	36.03	33.62	37.99	26.64	42.24	21.03	38.39	26.00	28.22
(La/Yb) _N	1.36	25.80	6.59	0.85	5.76	24.30	3.00	2.47	2.52	3.86	15.85	4.62	23.30	1.82	17.19	0.96	2.35
(Dy/Yb) _N	1.61	2.47	1.28	1.31	1.61	2.28	1.53	1.36	1.35	1.38	1.74	2.31	2.07	1.51	1.78	1.19	1.44
(La/Sm) _N	0.60	3.21	2.71	0.62	2.46	3.09	1.39	1.30	1.32	1.83	3.27	1.17	3.43	0.84	3.28	0.78	1.18
(Gd/Lu) _N	2.01	5.07	1.96	1.41	1.91	4.99	1.82	1.76	1.89	2.01	3.58	2.99	4.89	2.39	3.72	1.30	1.98
$\delta^{152}\text{Eu}$	0.88	0.91	4.43	1.12	4.33	0.88	1.06	1.04	1.06	1.57	0.90	2.00	0.87	1.42	0.86	1.82	1.59
$\delta^{157}\text{Eu}$	80.0	284.4	13.8	29.2	11.6	289.7	67.6	72.2	74.9	30.1	216.3	14.3	270.8	25.5	219.0	15.9	23.7
LREE/HREE	1.00	4.88	3.06	0.73	2.62	4.86	1.40	1.33	1.35	1.74	4.12	1.74	4.92	1.16	4.32	0.82	1.31
$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	7.7	11.0	7.5	7.6	7.5	10.8	7.6	6.8	—	6.8	7.8	8.1	—	—	9.0	6.9	7.6
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.706535	0.705839	—	—	—	0.705848	0.708559	0.707497	0.707281	0.706173	0.707168	—	0.705860	—	0.707152	—	—
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512587	0.512527	—	—	—	0.512533	0.512461	0.512568	0.512542	0.512670	0.512502	—	0.512518	—	0.512482	—	—
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	-1.0	-2.2	—	—	—	-2.0	-3.5	-1.4	-1.9	0.6	-2.7	—	-2.3	—	-3.0	—	—
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-1.4	-0.8	—	—	—	-0.8	-3.1	-0.8	-1.3	1.7	-1.3	—	-0.9	—	-1.7	—	—
$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	—	1.1	—	—	—	1.2	2.9	2.0	1.9	1.3	1.1	—	1.1	—	1.2	—	—

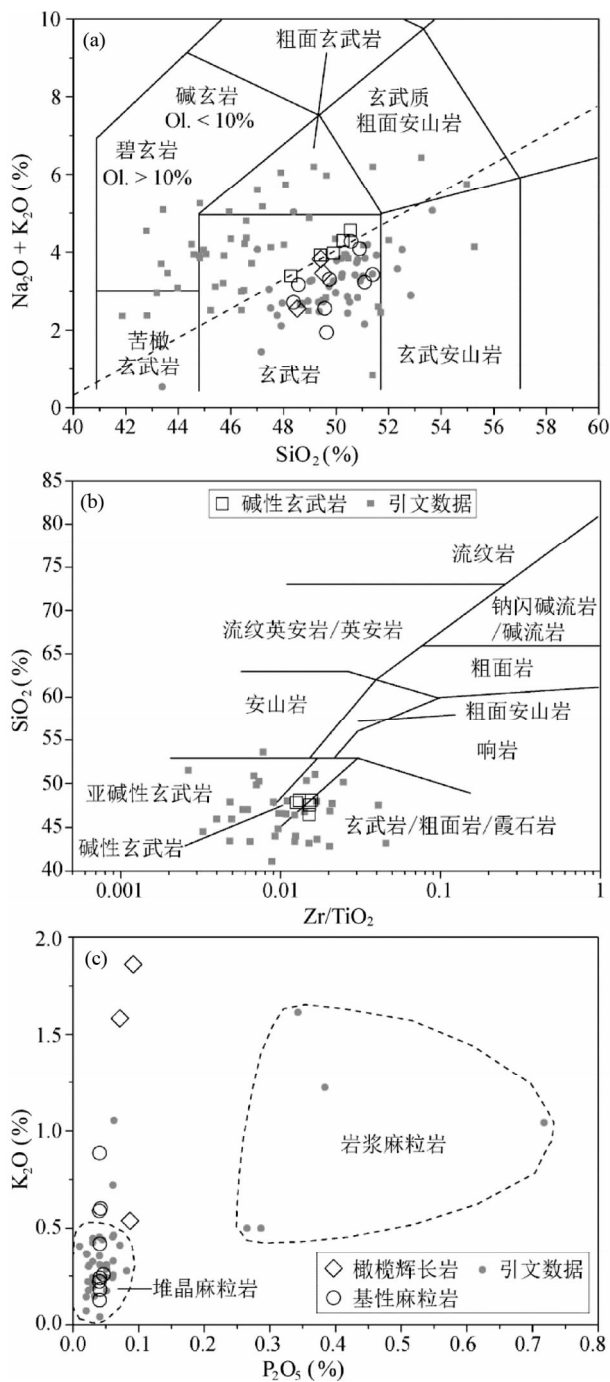


图3 道县虎子岩地区岩石分类图解
 (a) TAS图(据 Le Bas *et al.*, 1986), 碱性和亚碱性分界线据 MacDonalld and Katsura (1964); (b) SiO₂-Zr/TiO₂图(据 Winchester and Floyd, 1977); (c) K₂O-P₂O₅图. 引文数据同图5
 Fig.3 Classified diagrams of the rocks from Huziyan area, Daoxian

3件橄辉长岩也具有高MgO特征(12.32%~14.26%);基性麻粒岩具有富Al₂O₃(14.52%~24.12%)、富MgO(5.88%~13.73%)、贫K₂O(0.12%~0.87%)、贫P₂O₅(0.04%~

0.05%)的特征(图3c),其中有三件样品(Na₂O + K₂O) < 3%,且12% < MgO < 18%,属于苦橄质岩石。橄辉长岩HZY13和14属于高钾钙碱性系列,橄辉长岩HZY12和其他样品为中钾钙碱性系列到低钾拉斑玄武岩系列。CIPW标准矿物计算都无石英,属于硅不饱和岩石(表1)。

4.2 微量元素

以上三类岩石的主量元素特征尽管都显示为基性岩石,但是却具有不同的微量元素特征。碱性橄辉玄武岩具明显的轻稀土(LREE)富集、重稀土(HREE)亏损的特征((La/Yb)_N = 16~26,图4a),具弱的Eu负异常(δEu = 0.86~0.91),且Sc(18 × 10⁻⁶~28 × 10⁻⁶)、Co(44 × 10⁻⁶~54 × 10⁻⁶)、Cr(909 × 10⁻⁶~1596 × 10⁻⁶)、Ni(534 × 10⁻⁶~706 × 10⁻⁶)等相容元素含量高(表1);橄辉长岩的LREE富集程度((La/Yb)_N = 2.5~3.0)弱,具弱Eu正异常(δEu = 1.03~1.06);基性麻粒岩捕虏体稀土元素含量较低(ΣREE = 11.55 × 10⁻⁶~30.13 × 10⁻⁶),几乎所有捕虏体都显示明显的Eu正异常(δEu = 1.42~4.41),且麻粒岩样品的HREE由高到低分为三组(第一组HZY01、06;第二组HZY15、21、23、24和第三组HZY05、07、18)(图4a),出现重稀土的分组特征。所有样品均显示富集大离子亲石元素和亏损高场强元素,玄武岩HZY17、22两个样品还亏损Sr,橄辉长岩相对于Ba和Rb亏损U、Th,基性麻粒岩捕虏体明显亏损Rb、Ba、U、Th(图4b)。

4.3 Sr-Nd-O同位素

玄武岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值为0.7058~0.7072,ε_{Nd}(t)为-1.74~-0.81;橄辉长岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值高于玄武岩,为0.7072~0.7086,ε_{Nd}(t)为-3.1~-0.83;基性麻粒岩HZY01、06的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值分别为0.7065和0.7062,ε_{Nd}(t)分别为-1.37和1.74。玄武岩的Nd模式年龄比较一致(1.1~1.2Ga);橄辉长岩中,HZY12的Nd模式年龄为2.87Ga,HZY13、14的Nd模式年龄分别为1.98Ga和1.9Ga;基性麻粒岩HZY06的Nd模式年龄为1.29Ga。

完成全岩氧同位素测试的有14件样品,4件玄武岩氧同位素值(δ¹⁸O_{V-SMOW})为7.8‰~11.0‰,2件橄辉长岩的值为6.8‰~7.6‰,8件基性麻粒岩的值为6.8‰~8.1‰。其中玄武岩的δ¹⁸O_{V-SMOW}值明显高于其他样品(表1)。

5 讨论

5.1 玄武岩和橄辉长岩成因

玄武岩中橄辉斑晶具有深源捕虏晶的特征:扭折带、碎裂结构及熔蚀边;CIPW标准矿物计算显示有3个样品无霞石分子,这应该是K、Na元素因本身活动性较强而在蚀变过程中发生迁移造成的。稀土元素球粒陨石标准化图解显

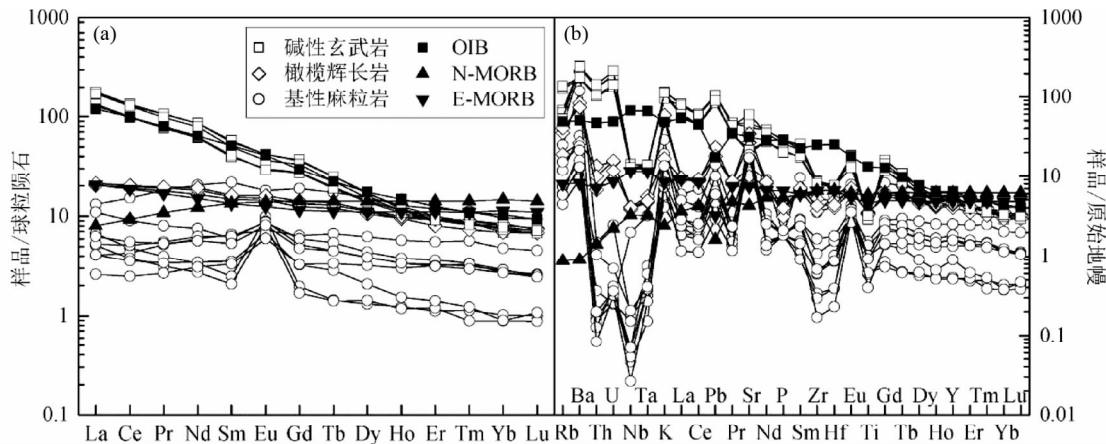


图4 道县虎子岩地区岩石球粒陨石标准化稀土元素配分图(a, 标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素配分图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) of the rocks in Huziyan area, Daoxian

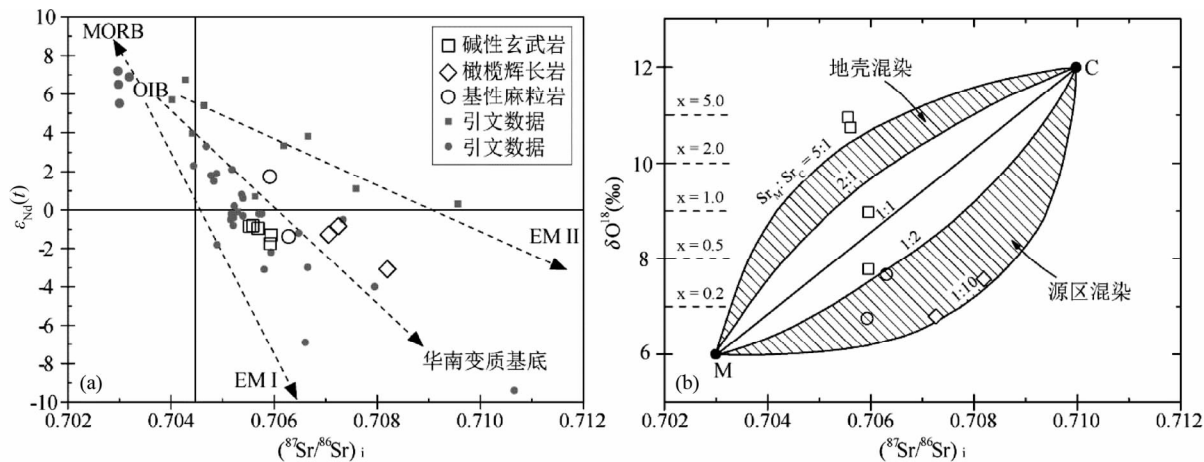


图5 道县虎子岩玄武岩和基性捕虏体 Sr-Nd-O 同位素投图

(a) Sr-Nd 同位素投图, 灰色方格数据引自 Jiang *et al.* (2009), Zhao *et al.* (1998), 孔华等(2000), 贾大成等(2002), 朱介寿等(2005), 朱勤文等(1996); 灰色圆点数据引自 Dai *et al.* (2008), Yu *et al.* (2003b), 朱介寿等(2005), 孔华等(2000); 华南变质基底引自 Yu *et al.* (2003a); 图6、图7、图8的引文数据来源和图例同此图; (b) Sr-O 同位素投图, X 为混染物(C)相对地幔(M)的比例, 比值表示地幔(M) Sr 的含量相对混染物(C)的比例, 据 James (1981)

Fig. 5 Sr-Nd-O isotopic plots of Huziyan rocks

示该玄武岩具有 OIB 特征(图4), 同时具有高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值(表1), 显示 EM II 型富集地幔特征。HZY02 和 09 二个样品氧同位素值分别为 11.0‰ 和 10.8‰, 对应的 CaO 的含量分别为 11.3% 和 11.6%, 而另外 2 个样品的 CaO 含量较低, 氧同位素值相对偏低(表1、图5b); 通过显微镜观察发现, 玄武岩样品都有不同程度的蚀变, 并且氧同位素值低的样品比高的样品蚀变程度弱(图2a-d), 暗示玄武岩氧同位素组成偏高可能是其上升到地表后由碳酸盐岩组分的加入及后期风化蚀变作用造成的, 相对均一且为负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和靠近 EM II 地幔端员的特点, 指示该玄武岩源区在发生部分熔融之前就已经发生了富集。

利用地幔条件下尖晶石和石榴子石之间 La、Dy、Yb 的分配系数差异可以将两者稳定存在区域内形成的熔体区分开(图6), 当熔融程度较低的时候, 尖晶石相和石榴子石相部分熔融并未使得 $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值发生较大变化, 而石榴子石相 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 的变化要远大于尖晶石相; 当出现两相熔体的混合产物时, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 都有较大变化。本文 5 件玄武岩显示部分熔融由尖晶石相向两相熔体混合的趋势进行, 其熔融比例小于 1%, 这表明岩浆源区深度有增大的趋势, 其应该来自岩石圈地幔中部到下部的区域, 并且岩石富 K 的特征也暗示该玄武岩浆是源区低度部分熔融形成的, 进一步说明虎子岩玄武岩为具有原生幔源岩浆属性的碱性橄

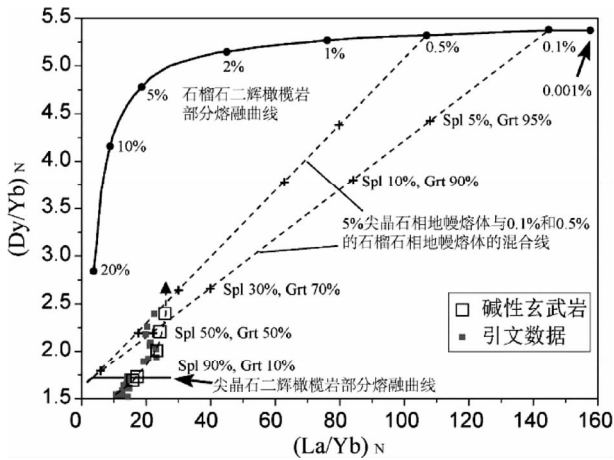


图6 虎子岩玄武岩 $(La/Yb)_N - (Dy/Yb)_N$ 图 (分配系数引自 McKenzie and O' Nions, 1991)

Fig. 6 $(La/Yb)_N$ vs. $(Dy/Yb)_N$ diagram for basalts in Huziyan (partition coefficient after McKenzie and O' Nions, 1991)

榄玄武岩。

通过对比橄榄辉长岩和碱性橄榄玄武岩的化学成分可以发现,前者的 TiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 都高于后者,而前者的 MgO 、 $Fe_2O_3^T$ 、 K_2O 和 P_2O_5 的含量却低于后者(表1),相容元素 Fe、Mg 含量相对较低应该是形成橄榄辉长岩岩浆中的橄榄石捕虏晶较少的体现,而 K、P 偏低可能分别与元素不相容性和磷灰石的提前结晶有关系;并且轻稀土元素和中稀土元素和玄武岩相比有很大差别,重稀土元素反而差别不大(图4a),Nb、Ta、Zr、Hf 及 HREE 等高场强元素的含量与玄武岩的差别没有 LILE 表现的那么明显(图4b);橄榄辉长岩显微镜观察结果显示橄榄石具有碎裂及熔蚀结构;Sr-Nd 同位素组成更靠近 EMII 地幔端员, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值及 Nd 模式年龄比玄武岩的大(表1、图5a),说明橄榄辉长岩是先形成的上述玄武岩浆在未到达地表之前发生结晶作用形成的,之后又被碱性橄榄玄武岩带到地表,这也是该岩石比碱性橄榄玄武岩钾含量低的原因。同时橄榄辉长岩的氧同位素组成也进一步说明形成上述碱性橄榄玄武岩岩浆的源区并未受到地壳的混染。

5.2 基性麻粒岩成因

本文的基性麻粒岩 Al_2O_3 、 Na_2O 、 P_2O_5 和 K_2O 含量相对较低(表1、图3c),具有堆晶麻粒岩的特征。在微量元素和稀土元素方面,这些基性麻粒岩也表现出相对较低的稀土元素含量(1~10 个对数单位,图4a)和亏损大离子亲石元素(Rb, Ba, Th, U, 图4b)的特征,这与 Yu *et al.* (2003b) 的研究结果是一致的,表明其为堆晶麻粒岩。在 $Mg^\# - SiO_2/Al_2O_3$ 图解中(图7),所有的样品都落在了“基性1”区域里,显示了辉石从初始玄武岩浆堆积的趋势,并具有相对低的 SiO_2/Al_2O_3 值和恒定的 $Mg^\#$ (77~82) 等特征,大量斜长石的出现

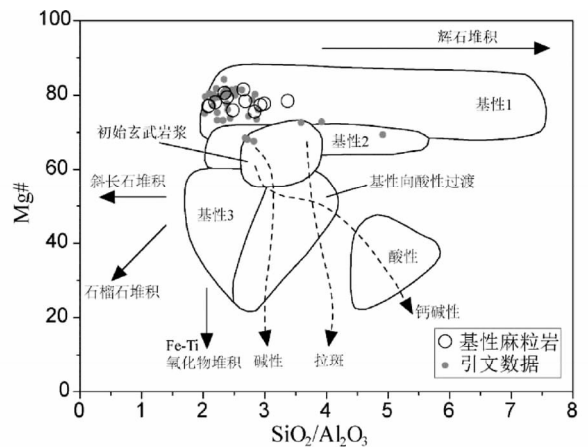


图7 虎子岩基性捕虏体 $Mg^\# - SiO_2/Al_2O_3$ 图

“基性1”为原始玄武岩浆堆晶作用的结果或是已含一定比例镁铁质堆晶相的玄武岩浆;“基性2”为固结玄武岩浆或是相对于“基性1”较为演化的玄武岩浆的堆晶相;“基性3”则为中、酸性岩浆堆晶作用的结果或是变质沉积岩及中性火成岩的熔融残余;“基性向酸性过渡”为中性麻粒岩;“酸性”为酸性麻粒岩;虚线箭头表示岩浆系列分异的平均趋势,实线箭头表示与特征矿物相堆积有关的岩石组成变化趋势,详见 Kempton and Harmon (1992) 和 Kempton *et al.* (1997)

Fig. 7 $Mg^\#$ vs. SiO_2/Al_2O_3 diagram for the gabbroic xenoliths from Huziyan

(Al_2O_3 含量相对较高)是造成 SiO_2/Al_2O_3 值偏低主要原因,这些都在显微镜观察以及稀土元素正的 Eu 异常特征上得到验证(图2f, g、图4a)。本文基性麻粒岩捕虏体 Sr-Nd 同位素组成显示其具有壳幔端员混合的特征(图5a),和 Dai *et al.* (2008) 的结果一致。可以看出,基性麻粒岩捕虏体是基性岩浆底侵到地壳底部与地壳物质发生了反应,形成的新岩浆经历了结晶分异和矿物晶体的堆积,辉石和斜长石颗粒边界形成平直、夹角为 120 度的镶嵌粒状平衡结构指示其经历了麻粒岩相变质作用。

值得一提的是,这些麻粒岩捕虏体具有低钾拉斑玄武岩系列向中钾钙碱性系列演化和重稀土分组的特征。其中, HZY01 比 HZY15 有相对较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(图5a)和相对含量较高的稀土元素(图4a),表明第一组麻粒岩较第二组麻粒岩有含量更高的稀土元素是部分地壳物质加入底侵岩浆造成的,对应的氧同位素组成也显示第一组麻粒岩中的地壳组分比第二组多(图5b);而第二组麻粒岩较第三组麻粒岩有相对较高的 HREE 含量和 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 等高场强元素(图4),造成这种特征出现可能是同一时期的底侵岩浆中石榴石和金红石发生不同程度的分离结晶造成的,也可能是不同时期演化的底侵岩浆自身造成的。但是,根据基性麻粒岩的堆晶特征和只含有相指示矿物尖晶石,则石榴石和金红石组分分离结晶的程度不同造成重稀土和高场强元素含量出现分组特征的可能性更大。

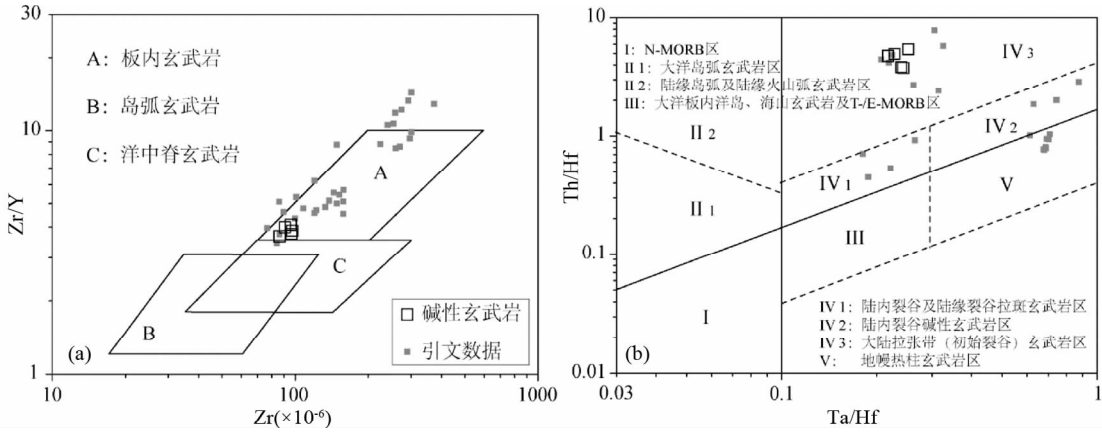


图8 虎子岩玄武岩微量元素成分构造环境判别图

(a) Zr/Y-Zr 图解(据 Pearce and Norry, 1979); (b) Th/Hf-Ta/Hf 图解(据汪云亮等, 2001)

Fig. 8 Discrimination diagram for tectonic setting of the basalts in Huziyan

5.3 华夏板块东、西部下地壳幔相互作用的差异

麻粒岩的形成主要受地热条件的控制(翟明国和刘文军, 2001)。通过对比,我们发现沿海地区新生代玄武岩中的基性麻粒岩主要有岩浆型和堆晶型两种(Yu *et al.*, 2003b),而湘南地区中生代玄武岩中的基性麻粒岩都是堆晶型(图3c)。在区域上,这些基性麻粒岩意味着华夏板块下地壳在燕山期十分发育基性岩浆的底侵作用。沿海地区的堆晶麻粒岩的Sr-Nd同位素组成具有亏损地幔的特征,形成时间大概是在112Ma(Yu *et al.*, 2003b),而本文的堆晶麻粒岩具有壳幔混合的特征(图5),形成时间在250~200Ma(Dai *et al.*, 2008; 郭锋等, 1997)。这就意味着沿海地区在燕山晚期的壳幔相互作用要比湘南地区燕山早期的壳幔相互作用强烈,而湘南地区具有亏损地幔特征的堆晶麻粒岩的缺失则意味着湘南地区壳幔相互作用相对比较彻底,后期的岩浆底侵作用不明显。温压计算结果表明,湘南地区基性麻粒岩形成的温度和深度分别为801~927°C和31km(朱介寿等, 2005),而沿海地区基性麻粒岩形成的温度和深度分别为814~893°C和23~27km,且地温梯度较高(于津海等, 2002),指示沿海地区燕山晚期拉张的构造环境比湘南地区要强烈。

5.4 构造环境和地球动力学意义

在印支期,华南地区发生了造山运动,早期(251~228Ma)为同碰撞挤压的构造环境,到晚期(228~199Ma)局部转变为拉张环境;到了燕山早期(200~145Ma),华南地区以拉张的构造环境为主(Zhou *et al.*, 2006),主要表现是侏罗纪(184~152Ma)A型花岗岩和碱性岩,其主要分布在“十杭”裂谷带南段地区,江西南部也有少许分布(王强等, 2002, 2003, 2005)。前人的年代学研究表明,虎子岩辉长岩捕虏体形成时代为250~200Ma(Dai *et al.*, 2008; 郭锋等, 1997),玄武岩Ar-Ar年龄为152~147Ma(Li *et al.*, 2004),

这就意味着辉长岩捕虏体应该是印支期挤压构造背景下底侵玄武质岩浆与地壳物质发生混合的产物,道县虎子岩碱性橄榄玄武岩具有高的Zr/Y比和高的Th/Hf、Ta/Hf比(图8)而有别于典型的岛弧玄武岩,同时钾含量较高也暗示其岩浆是在板块内部拉张环境下岩石圈地幔由减压低度部分熔融形成(Müller *et al.*, 1992),并且辉长岩捕虏体内蠕虫状尖晶石也指示拉张减压环境。从时间上来看,本文报导的玄武岩和基性麻粒岩捕虏体分别对应于印支期和燕山晚期华南东部地区的构造事件,进一步说明华南板块中生代特提斯构造域向以板片俯冲为主导的太平洋构造域转换是虎子岩地区岩浆系列发生演化的根本因素。

6 结论

(1) 虎子岩玄武岩为碱性橄榄玄武岩,具有较高的钾含量,是陆内拉张环境下、富集岩石圈地幔部分熔融的产物,橄榄辉长岩是该玄武岩浆在未达到地表之前局部发生结晶作用后形成的。

(2) 基性麻粒岩捕虏体具有从低钾拉斑玄武岩系列向中钾钙碱性系列演化的特征,是玄武岩浆底侵在地壳底部与地壳物质发生反应,并经历结晶分异、晶体堆积和麻粒岩相变质作用形成,综合华南其他地区研究成果,揭示了华夏板块湘南地区下地壳的基本组成主要为堆晶的基性麻粒岩,而沿海地区二者都有。

(3) 沿海地区在燕山晚期的壳幔相互作用要比湘南地区燕山早期的壳幔相互作用强烈,而湘南地区具有亏损地幔特征的堆晶麻粒岩的缺失则意味着湘南地区壳幔相互作用相对比较彻底,后期的岩浆底侵作用不明显。

(4) 华南板块中生代特提斯构造域向以板片俯冲为主导的太平洋构造域转换是虎子岩地区岩浆系列发生演化的根本因素,其控制着华南东部地区岩石圈挤压和拉张的构造

环境。

致谢 感谢李玺瑶在野外工作, 李文霞、刘栋、常青松在室内测试工作中给予的帮助。

References

- Bohlen SR and Mezger K. 1989. Origin of granulite terranes and the formation of the lowermost continental crust. *Science*, 244(4902): 326–329
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier
- Charvet J, Shu LS, Shi YS, Guo LZ and Faure M. 1996. The building of South China: Collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3–5): 223–235
- Che ZC, Liu L and Luo JH. 2002. *The Regional Tectonics of China and Its Adjacent Areas*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Christensen NI and Mooney WD. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research*, 100(B6): 9761–9788
- Dai BZ, Jiang SY, Jiang YH, Zhao KD and Liu DY. 2008. Geochronology, geochemistry and Hf-Sr-Nd isotopic compositions of Huziyuan mafic xenoliths, southern Hunan Province, South China: Petrogenesis and implications for lower crust evolution. *Lithos*, 102(1–2): 65–87
- Du YS, Collerson KD, Zhao JX and Pang BC. 1999. Characteristics and petrogenesis of granulite enclaves in S-type granites in the junction of Guangdong and Guangxi provinces. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 309–314 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Liu XM, Yuan HL, Hattendorf B, Günther D, Chen L and Hu SH. 2002. Determination of forty-two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards Newsletter: Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 26(2): 181–196
- Guo F, Fan WM, Lin G and Lin YX. 1997. Geochronology and petrogenesis of gabbroic xenoliths from Daoxian, southern Hunan Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 42(15): 1661–1664 (in Chinese)
- Holbrook WS, Mooney WD and Christensen NI. 1992. The seismic velocity structure of the deep continental crust. In: Fountain DM, Arculus R and Kay RW (eds.). *Continental Lower Crust*. Amsterdam: Elsevier, 1–44
- Huang XL, Xu YG and Liu DY. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, East China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1): 127–149
- James DE. 1981. The combined use of oxygen and radiogenic isotopes as indicators of crustal contamination. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 9: 311–344
- Jia DC, Hu RZ and Lu Y. 2002. Lithogeochemistic characteristics and tectonic setting of basaltic rocks in southeastern Hunan Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 32(3): 209–214 (in Chinese with English abstract)
- Jiang N, Carlson RW and Guo JH. 2011. Source of Mesozoic intermediate-felsic igneous rocks in the North China craton: Granulite xenolith evidence. *Lithos*, 125(1–2): 335–346
- Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ, Liao SY, Zhao KD and Ling HF. 2009. Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107(3–4): 185–204
- Kempton PD and Harmon RS. 1992. Oxygen isotope evidence for large-scale hybridization of the lower crust during magmatic under plating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 971–986
- Kempton PD, Downes H and Embey-Isztin A. 1997. Mafic granulite Xenoliths in Neogene alkali basalts from the Western Pannonian Basin: Insights into the lower crust of a collapsed orogen. *Journal of Petrology*, 38(7): 941–970
- Kong H, Jin ZM and Lin YX. 2000. Petrology and chronology of granulite xenolith in Daoxian County, Hunan Province. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(2): 115–119 (in Chinese with English abstract)
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745–750
- Li CN, Zhong CS, Wang FZ and Liu CF. 2001. Geochemistry and petrogenesis of Mesozoic basaltic rocks and their deep-source enclaves in northern Guangxi-southern Hunan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(2): 112–122 (in Chinese with English abstract)
- Li QL, Wu FY, Li XH, Qiu ZL, Liu Y, Yang YH and Tang GQ. 2011. Precisely dating Paleozoic kimberlites in the North China Craton and Hf isotopic constraints on the evolution of the subcontinental lithospheric mantle. *Lithos*, 126(1–2): 127–134
- Li XH, Chung SL, Zhou HW, Lo CH, Liu Y and Chen CH. 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(1): 193–215
- Li ZX, Li XH, Zhou HW and Kinny PD. 2002. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30(2): 163–166
- Liu YS, Gao S, Jin SY, Hu SH, Sun M, Zhao ZB and Feng JL. 2001. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba basalt, North China Craton; Implications for petrogenesis and lower crustal composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(15): 2589–2604
- MacDonald GA and Katsura T. 1964. Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petrology*, 5(1): 82–133
- McKenzie DP and O’Nions RK. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32(5): 1021–1091
- Müller D, Rock NMS and Groves DI. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: A pilot study. *Mineralogy and Petrology*, 46(4): 259–289
- Pearce JA and Norry MJ. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33–47
- Rudnick RL. 1992. Xenoliths-sample of the lower continental crust. In: Fountain DM, Arculus RJ and Kay RW (eds.). *The Continental Lower Crust*. Amsterdam: Elsevier, 269–308
- Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267–309
- Rudnick RL and Gao S. 2004. Composition of the Continental Crust. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Science, 1–64
- Shu LS. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: From Cathaysian block to Caledonian Period folded orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418–431 (in Chinese with English abstract)
- Smithson SB. 1978. Modeling continental crust: Structural and chemical constraints. *Geophysical Research Letters*, 5(9): 749–752
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Sun T. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332–335 (in Chinese with English abstract)

- Wang FZ, Li HL, Zhu QW and Lu FX. 1997. Assemblages of anatectic xenoliths from volcanic and the petrology model of lithosphere in South Hunan Province. *Geological Science and Technology Information*, 16(3): 1–6 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL, Li XH and Bao ZW. 2002. Ascertainment of the Shaoxing-Enping alkali-rich intrusive rock zone and preliminary discussion on its geodynamic implications. *Geochimica*, 31(5): 433–442 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Ma JL and Bao ZW. 2003. SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implications of aegiriteaugite syenite from Yangfang in Wuyi Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1582–1588 (in Chinese)
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Dai TM, Xu JF and Ma JL. 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China: Constraints for Late-Mesozoic tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795–808 (in Chinese with English abstract)
- Wang YL, Zhang CJ and Xiu SZ. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413–421 (in Chinese with English abstract)
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Xu DM, Ma DS, Zhang YM and Xie CF. 2007. Origin and geological significance of granulites from Qiongzong complex. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 35–41 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS and Xie X. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction SE China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 318–334 (in Chinese with English abstract)
- Yu JH, Zhao L and Xu XS. 2002. Discovery and implications of granulite facies xenoliths from some Cenozoic basalts, SE China. *Geological Journal of China Universities*, 8(3): 280–292 (in Chinese with English abstract)
- Yu JH, Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL and Zhang M. 2003a. Granulite xenoliths from Cenozoic basalts in SE China provide geochemical fingerprint to distinguish lower crust terranes from the North and South China tectonic Blocks. *Lithos*, 67(1–2): 77–102
- Yu JH, Xu XS and Zhou XM. 2003b. Late Mesozoic crust-mantle interaction and lower crust components in South China: A geochemical study of mafic granulite xenoliths from Cenozoic basalts. *Science in China (Series D)*, 46(5): 447–460
- Zhai MG and Liu WJ. 2001. The formation of granulite and its contribution to evolution of the continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 28–38 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Gao S, Zhong ZQ, Zhang BR, Zhang L and Hu SH. 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chemical Geology*, 186(3–4): 281–299
- Zhao ZH, Bao ZW and Zhang BY. 1998. Geochemistry of the Mesozoic basaltic rocks in southern Hunan Province. *Science in China (Series D)*, 41(1): 102–112
- Zheng JP, O'Reilly SY, Griffin WL, Lu FX and Zhang M. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong Peninsula, Sino-Korean Craton. *International Geology Review*, 40(6): 471–499
- Zheng JP, Sun M, Lu FX and Pearson M. 2003. Mesozoic lower crustal xenoliths and their significance in lithospheric evolution beneath the Sino-Korean Craton. *Tectonophysics*, 361(1–2): 37–60
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Lu FX, Yu CM, Zhang M and Li HM. 2004a. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: Evolution of the lower crust beneath the North China craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(1): 79–103
- Zheng JP, O'Reilly SY, Griffin WL, Zhang M, Lu FX and Liu GL. 2004b. Nature and evolution of Mesozoic-Cenozoic lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China. *Lithos*, 74(1–2): 41–65
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33
- Zhu JS, Cai XL, Cao JM, Gao DZ, Zhao FQ, Du YS and Wang Y. 2005. The Three-Dimensional Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China and East China Sea. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Zhu QW, Wang FZ, Lu FX and Zhong ZQ. 1996. Petrological properties of Mesozoic-Cenozoic basalts from southern Hunan Province. *Geoscience*, 10(4): 461–469 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 车自成, 刘良, 罗金海. 2002. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社
- 杜杨松, Collerson KD, 赵建新, 庞保成. 1999. 两广交界地区S型花岗岩中麻粒岩包体的特征和成因. *岩石学报*, 15(2): 309–314
- 郭锋, 范蔚茗, 林舸, 林源贤. 1997. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨. *科学通报*, 42(15): 1661–1664
- 贾大成, 胡瑞忠, 卢焱. 2002. 湘东南玄武质岩石地球化学特征及构造环境. *吉林大学学报(地球科学版)*, 32(3): 209–214
- 孔华, 金振民, 林源贤. 2000. 道县玄武岩中麻粒岩包体的岩石学及年代学. *长春科技大学学报*, 30(2): 115–119
- 李昌年, 钟称生, 王方正, 刘春芳. 2001. 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. *岩石矿物学杂志*, 20(2): 112–122
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. *高校地质学报*, 12(4): 418–431
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. *地质通报*, 25(3): 332–335
- 王方正, 李红丽, 朱勤文, 路凤香. 1997. 湘南火山岩深源包体组合及岩石圈岩石学模型. *地质科技情报*, 16(3): 1–6
- 王强, 赵振华, 熊小林, 李献华, 包志伟. 2002. 华南绍兴-恩平富碱侵入岩带的厘定及其动力学意义初探. *地球化学*, 31(5): 433–442
- 王强, 赵振华, 简平, 熊小林, 马金龙, 包志伟. 2003. 武夷山洋坊霓辉石正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. *科学通报*, 48(14): 1582–1588
- 王强, 赵振华, 简平, 熊小林, 包志伟, 戴樟谟, 徐继峰, 马金龙. 2005. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. *岩石学报*, 21(3): 795–808
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. *岩石学报*, 17(3): 413–421
- 徐德明, 马大铨, 张业明, 谢才富. 2007. 琼中麻粒岩的成因及地质意义. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 35–41
- 徐夕生, 谢听. 2005. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用. *高校地质学报*, 11(3): 318–334
- 于津海, 赵蕾, 徐夕生. 2002. 中国东南新生代玄武岩中麻粒岩相捕虏体的新发现及其意义. *高校地质学报*, 8(3): 280–292
- 翟明国, 刘文军. 2001. 麻粒岩的形成及其对大陆地壳演化的贡献. *岩石学报*, 17(1): 28–38
- 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 高德章, 赵凤清, 杜杨松, 汪洋. 2005. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化. 北京: 地质出版社
- 朱勤文, 王方正, 路凤香, 钟增球. 1996. 湘南中生代玄武岩岩石学特征. *现代地质*, 10(4): 461–469