

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.004

江西余干支家桥橄榄辉长岩矿物化学特征 及其地球动力学意义

严文亚^{1,2,3}, 郭国林^{1,2*}, 贾琳^{1,2,3}, 杨铃^{1,2,3}, 陈缵诺^{1,2,3}

YAN Wen-Ya^{1,2,3}, GUO Guo-Lin^{1,2*}, JIA Lin^{1,2,3}, YANG Ling^{1,2,3}, CHEN Zuan-Nuo^{1,2,3}

1. 钇资源探采与核遥感全国重点实验室, 江西南昌 330013; 2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,
江西南昌 330013; 3. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013

1. National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Nanchang 330013, Jiangxi,
China; 2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013,
Jiangxi, China; 3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China

摘要: 橄榄辉长岩起源于岩石圈地幔, 其中的造岩矿物的结构和成分特征与岩石成因密切相关, 可以反映岩浆源区特征、结晶的物理化学条件以及地球动力学背景。本文对产于华夏地块的江西余干支家桥橄榄辉长岩开展了岩相学和矿物化学分析以探讨其形成的背景。该橄榄辉长岩的造岩矿物由单斜辉石、斜长石、橄榄石及少量角闪石和金云母等组成。橄榄石为他形粒状, 边缘发育蛇纹石化, $Fo=80.68 \sim 82.20$, 属贵橄榄石, CaO 含量低于 0.1 wt.%, 指示其为地幔捕虏晶; 单斜辉石为透辉石和普通辉石, $Mg^{\#}=82.52 \sim 85.95$, 矿物成分计算表明岩体的母岩浆为钙碱性玄武质岩浆, 结晶温度为 $1173 \sim 1193$ °C, 结晶压力为 0.25 ~ 0.39 GPa。橄榄辉长岩中富含含水矿物及单斜辉石结晶时岩浆含水量(2.1% ~ 2.7%)指示其母岩浆具有富水的特征, 可能其岩浆源区受到过俯冲流体的交代改造。结合区域地质背景认为支家桥地区橄榄辉长岩可能是受俯冲流体交代过的岩石圈地幔在新生代伸展背景下发生减压熔融, 形成橄榄辉长岩的母岩浆, 母岩浆上升侵位于中下地壳的产物。

关键词: 单斜辉石; 橄榄石; 含水量; 地球动力学意义; 支家桥

中图分类号: P574.2

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-01-0051-12

Yan W Y, Guo G L, Jia L, Yang L and Chen Z N. 2025. Mineral Chemical Characteristics and Geodynamic Significance of Olivine Gabbro from the Zhijiaqiao Area, Yugan County, Jiangxi Province. *South China Geology*, 41(1): 51–62.

Abstract: Olivine gabbro originates from the mantle lithosphere, with the structural and compositional characteristics of its rock-forming minerals closely related to its petrogenesis, reflecting the characteristics of the magma source region, the physicochemical conditions of crystallization, and the geodynamic background. This paper conducts the petrographic and mineral chemical analyses on the olivine gabbro from the Zhijiaqiao area in the Cathaysia Block, to explore its formation background. The rock-forming minerals of this olivine Gabbro consist of clinopyroxene, plagioclase, olivine, and a small amount of hornblende and phlogopite. Olivine is xenomorphic granular and developing serpentinization alteration edge. With the Fo values of

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2024-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42262009)

第一作者: 严文亚(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为矿物学, E-mail: 15238491283@163.com

通讯作者: 郭国林(1979—), 男, 教授, 主要从事岩浆岩岩石学方面的教学与研究工作, E-mail: gglrobin@163.com

80.68~82.20, it belongs to the chrysolite, CaO content is less than 0.1 wt.%, indicated as mantle xenocrysts. The clinopyroxene is composed of diopside and augite, with $Mg^{\#}=82.52\sim85.95$. Mineral composition calculations indicate that the parent magma is calc-alkaline basaltic magma, with a crystallization temperature range of 1173~1193 °C and a crystallization pressure of 0.25~0.39 GPa. The richness in hydrous minerals and the water content (2.1%~2.7%) of the clinopyroxene in the olivine gabbro indicate that its parent magma is water-rich, possibly due to metasomatism by subduction-related fluids in the magma source region. Combined with the regional geological background, it is believed that the olivine gabbro in the Zhijiaqiao area may have originated from lithospheric mantle metasomatized by subduction fluids. Under the extensional tectonic setting of the Cenozoic, this mantle has undergone decompression melting, forming the parent magma of the olivine gabbro, which ascended and intruded into the middle-lower crust.

Key words: clinopyroxene; olivine; moisture capacity; geodynamic significance; the Zhijiaqiao area

板内基性岩浆活动与岩石圈演化、成矿作用以及区域动力学过程密切相关(张晓辉和翟明国, 2010; 姜常义等, 2015; 段雪鹏, 2019; 陈可等, 2024)。一般认为, 橄榄辉长岩多起源于岩石圈地幔, 其形成与演化可以反映地幔部分熔融、结晶分异等过程(孔会磊等, 2021), 能够为探究地幔物质组成、壳幔相互作用、构造环境演化过程等提供相应的信息。尤其是其中的造岩矿物的结构和成分, 可以对岩浆演化过程的物理化学条件提供约束(Ballhaus et al., 1991; Barnes and Roeder, 2001; 高文彬, 2021; 马博骋等, 2023)。

江绍断裂带位于扬子地块与华夏地块的交接部位, 西北侧为江南造山带, 发育大量的中-新生代沉积岩及同期侵入岩(李兆鼐等, 2003), 东南侧为华夏地块, 广泛发育火成岩。江西余干县支家桥橄榄辉长岩产于华夏地块内部, 江绍断裂带与政和-大浦断裂之间, 是研究板内基性岩浆活动及岩石圈深部作用的理想对象。左祖发等(2017)对该橄榄辉长岩开展了锆石 U-Pb 测年和地球化学工作, 获得年龄为 47.4 ± 0.5 Ma, 认为橄榄辉长岩可能是喜马拉雅期陆内伸展作用背景下岩石圈地幔部分熔融形成。已有研究表明, 板内岩浆岩在岩浆演化过程中不可避免的会受到地壳物质的混染, 而在这一过程中不同阶段结晶形成的矿物结构和成分更适合用来限定岩浆演化过程(Streck, 2008; 夏林圻等, 2010; 吴建亮等, 2019; Yu K Z et al., 2021; Long X Y et al., 2023)。因此本文通过对支家桥地区橄榄辉长岩中橄榄石、单斜辉石进

行岩相学和矿物化学研究, 进而探讨橄榄辉长岩的岩石成因及其地球动力学背景。

1 地质背景

华南陆块由扬子和华夏两个地块沿江绍断裂带多次拼合-裂解-再拼合而成的复杂大陆块(Wang X L et al., 2007; Li X H et al., 2009; 舒良树, 2012; Zhao G C, 2015; Shu L S et al., 2021)。新元古代中期华南陆块受古洋壳西北俯冲的影响一直处于大陆弧后环境(张少兵等, 2019; 张胜了等, 2024); 中生代时期受古太平洋板块俯冲的影响而处于伸展背景(舒良树, 2012; 张岳桥等, 2012; 李建华等, 2024); 新生代以来华南陆块因受太平洋板块和菲律宾海板块俯冲作用以及印度-欧亚板块碰撞的远程效应多因素影响, 经历了由伸展向挤压的构造体制转换(孙涛, 2006; Meng L F et al., 2012; 刘凯等, 2016; 王新毓等, 2020)。江绍断裂带作为华南陆块中分隔扬子与华夏两地块的深大断裂, 经历了强烈的构造-岩浆活动, 断裂带内广泛发育的岩浆岩保留了两地块碰撞拼贴及后期裂解等过程的信息(胡开明, 2001; 秦社彩等, 2019)。

江西余干县支家桥地区位于华夏地块内部, 江绍断裂带与政和-大浦断裂之间, 区内有镁铁质岩体(图 1), 侵入于青白口纪早期万年群牛头岭组(Qbn)和程源组(Qbc)中, 目前已经暴露到地表, 露头零星, 大部分被第四系所掩盖。岩石类型

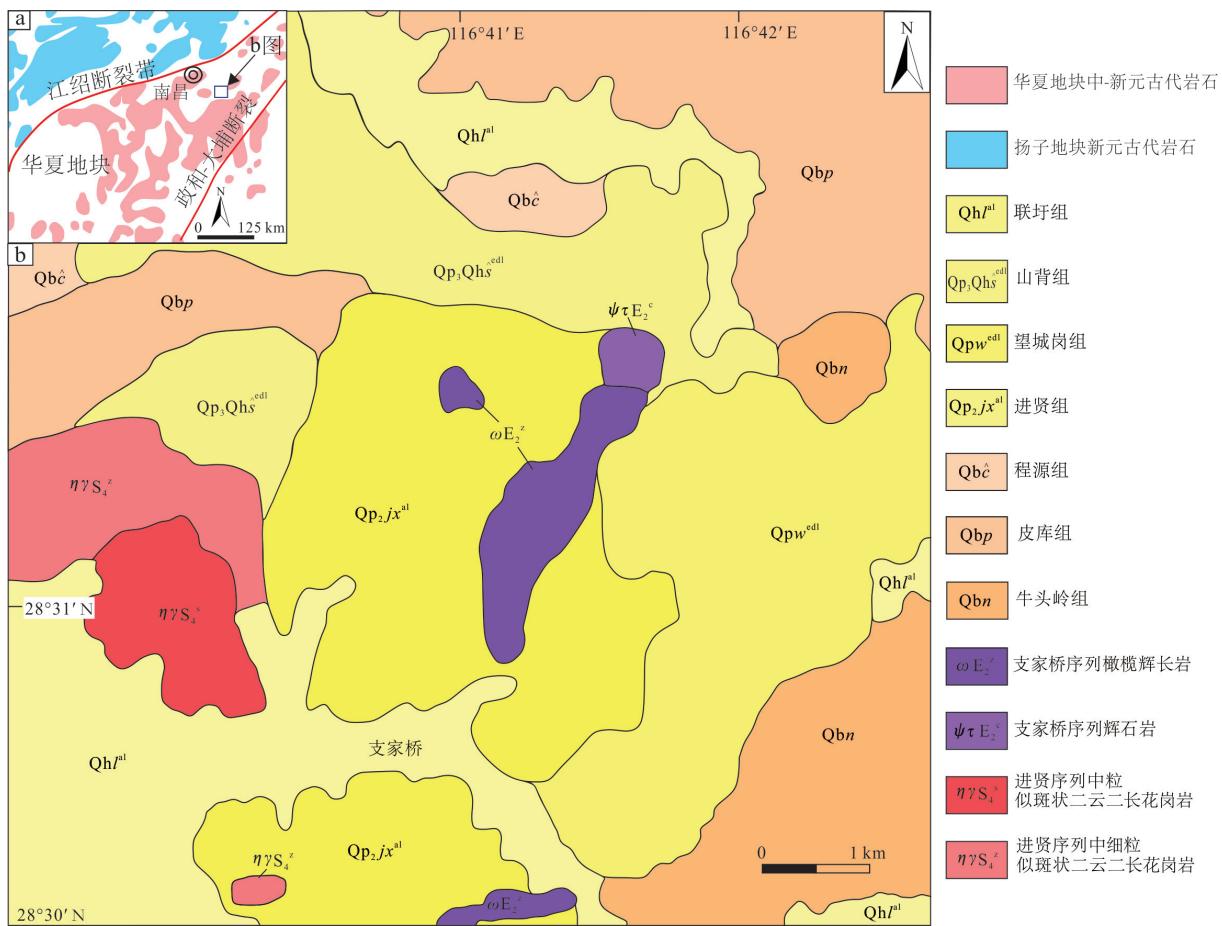


图 1 研究区大地构造位置图 (a) 和江西余干县支家桥地区地质简图 (b)

Fig. 1 Geotectonic location map of study area (a) and geological map of Zhijiaqiao area in Yungan County, Jiangxi Province (b)

a 图据 Zhao G C and Cawood (2012) 修改; b 图据江西省地质调查研究院(2009)修改

主要有橄榄辉长岩、辉长辉绿岩和橄榄辉石岩等。

状产出于橄榄石、辉石和长石之间(图 2c、2d)。

2 岩相学特征及分析方法

2.1 岩相学特征

橄榄辉长岩较新鲜, 呈灰黑色, 辉长结构, 块状构造。显微镜下可见矿物有单斜辉石(40%~45%)、斜长石(40%~45%)、橄榄石(10%~15%)、角闪石(<10%)和斜方辉石(<5%), 副矿物包括金云母、黄铁矿、磁铁矿和磷灰石等。橄榄石为半自形粒状或浑圆粒状, 裂纹较发育, 边缘发育轻微蛇纹石化(图 2a、2b、2c); 单斜辉石呈不规则半自形-他形粒状, 具有解理, 常见有斜长石包裹在其中形成含长结构(图 2c、2d), 主要为普通辉石和透辉石; 斜长石呈半自形-他形板状, 常见聚片双晶, 主要为倍长石(图 2c、2d), 角闪石通常以填隙

2.2 测试方法

样品磨制成电子探针片后对主要矿物进行电子探针矿物成分分析, 分析测试在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。仪器型号为日本电子公司 JXA-8530F, 分析过程按照国家电子探针定量分析标准(GB/T 15617-2007)进行, 原始数据采用在线 ZAF 方法校正。测试条件为: 加速电压 15 kV, 探针束流 20 nA, 束斑直径 5 μm, 峰值计数时间设定为 20 s, 背景计数时间设定为 10 s。标样选用美国 Structure Probe, Inc 提供的 SPI Standards 53 Minerals 02753-AB, 其中 Fe、Mg 标样选用透辉石, Ca 和 Na 选用斜长石, Si 和 Al 选用硬玉, Ti 选用金红石, Mn 选用 MnO, Ni 选用 MongOL, Fe、Mg、Ca、Na、Si、Al、Ti、Mn 和 Ni 的相对精度为±2%。

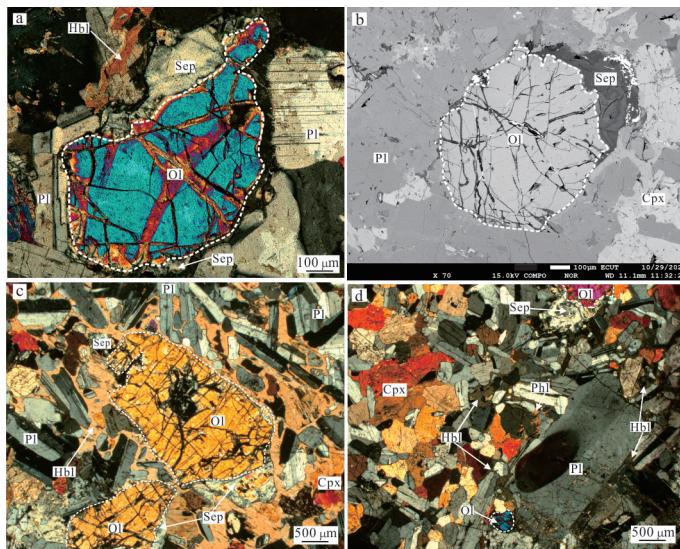


图2 支家桥橄榄辉长岩矿物组成显微特征

Fig. 2 Microscopic photos of hornblende in the Zhijiaqiao olivine gabbro

a.边缘有蛇纹石化蚀变边的橄榄石(正交偏光);b.发育蛇纹石化蚀变边的橄榄石(背散射电子图像);c.橄榄辉长岩中

填隙状角闪石和发生轻微蚀变的橄榄石(正交偏光);d.橄榄辉长岩的显微特征(正交偏光).

OI-橄榄石;Cpx-单斜辉石;Pl-斜长石;Hbl-角闪石;Phl-金云母;Sep-蛇纹石

3 矿物化学特征

橄榄石的电子探针成分分析结果及相关参数见表1。橄榄石的 SiO_2 含量为38.26~38.81 wt.%,平均为38.61 wt.%; FeO 含量为16.55~17.98 wt.%,平均为17.34 wt.%; MgO 含量为42.07~42.87 wt.%,平均为42.46 wt.%; CaO 含量为0~0.04 wt.%,平均为0.01 wt.%; TiO_2 含量为0~0.03 wt.%,平均为0.001 wt.%; NiO 含量为0.01~0.13 wt.%,平均为0.07 wt.%。橄榄石的Fo值多介于80.68~82.20之间(表1),为贵橄榄石。

单斜辉石的电子探针成分分析结果及相关参数见表2。结果显示 SiO_2 含量为51.13~53.07 wt.%,平均为52.07 wt.%; FeO 含量为4.83~6.99 wt.%,平均为5.56 wt.%; MgO 含量为15.20~17.24 wt.%,平均为15.77 wt.%; CaO 含量为18.68~22.90 wt.%,平均为21.95 wt.%; Al_2O_3 含量为2.49~4.61 wt.%,平均为3.54 wt.%。 $\text{Mg}^{\#}=82.52\sim85.95$,随着 $\text{Mg}^{\#}$ 降低 FeO 、 TiO 含量升高, CaO 含量降低, Al_2O_3 含量先升后降,在 $\text{Mg}^{\#}$ 为84.84时达到最高(图3)。根据Morimoto(1988)的辉石命名方案,单斜辉石随着 CaO 含量的降低在Wo-En-

Fs图解中表现出从透辉石到普通辉石过渡的趋势,但大部分落在透辉石区域中(图4)。

4 讨论

4.1 橄榄石来源

橄榄石在探讨地幔部分熔融和岩浆过程等问题中具有一定的指示作用(Kamenetsky et al., 2006; De H J et al., 2010; Li C S et al., 2012; Foley et al., 2013; 张柳毅等, 2016)。幔源岩浆在向上迁移的过程中橄榄石会作为捕虏晶被捕获,因此区分橄榄石是捕虏晶还是斑晶对探讨岩体成因、地幔物质组成、岩浆作用过程等有重要的科学意义。支家桥地区橄榄辉长岩中的橄榄石多呈浑圆粒状,发育裂纹和蛇纹石化蚀变边,初步判断为捕虏晶。根据Foley et al.(2013)的研究结果,Ca、Ti和Ni等元素的含量可以判断橄榄石是斑晶还是捕虏晶。当Ca含量 $<700\times10^{-6}$ 、Ni含量变化区间在 $2200\times10^{-6}\sim3400\times10^{-6}$ 、Ti含量 $<70\times10^{-6}$ 时通常为橄榄石捕虏晶,但经历过交代作用的橄榄石捕虏晶Ti值会更高。支家桥地区橄榄辉长岩中橄榄石成分显示 $\text{Fo}=80.68\sim82.20$,Ni含量为 $125\times10^{-6}\sim2712\times10^{-6}$,Ca含量在 $0\times10^{-6}\sim633\times10^{-6}$

表 1 支家桥橄榄辉长岩中橄榄石化学组成电子探针分析结果 (wt.%) 及相关参数

Table 1 Electron microprobe analysis results (wt.%) and related parameters of olivine chemical composition in Zhijiaqiao olivine gabbro

	ZJQ16-2-4	ZJQ16-2-7	ZJQ16-2-9	ZJQ16-3-11	ZJQ16-3-15	ZJQ16-3-22	ZJQ16-3-23	ZJQ16-3-24	ZJQ16-3-25	ZJQ16-3-27
SiO ₂	38.64	38.71	38.26	38.73	38.61	38.68	38.78	38.54	38.81	38.37
TiO ₂	0	0	0	0.04	0	0.03	0	0	0	0.01
Al ₂ O ₃	0.03	0.04	0.01	0.01	0.03	0	0.01	0	0.02	0.01
Cr ₂ O ₃	0.04	0	0.02	0	0.02	0	0.02	0	0	0.02
FeO	17.29	17.64	17.26	17.92	17.98	17.31	17.09	17.04	16.55	17.29
MnO	0.25	0.24	0.24	0.24	0.29	0.3	0.19	0.27	0.25	0.3
MgO	42.3	42.49	42.29	42.07	42.12	42.49	42.82	42.49	42.87	42.69
CaO	0	0	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
Na ₂ O	0.02	0	0.01	0	0	0.02	0	0.01	0.01	0
K ₂ O	0.02	0	0	0.02	0	0	0.01	0.01	0	0
NiO	0.01	0.09	0.01	0.08	0.13	0.06	0.07	0.09	0.06	0.07
Total	98.58	99.21	98.11	99.14	99.2	98.89	99.01	98.47	98.59	98.77
Si	1.99	1.99	1.98	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.98
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	0.37	0.38	0.37	0.39	0.39	0.37	0.37	0.37	0.36	0.37
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01
Mg	1.63	1.63	1.63	1.61	1.62	1.63	1.64	1.64	1.64	1.64
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fo	81.35	81.11	81.37	80.72	80.68	81.4	81.7	81.63	82.2	81.48

之间($\text{CaO} < 0.1 \text{ wt.\%}$, 图 5), Ti 含量为 $0 \times 10^{-6} \sim 484 \times 10^{-6}$, 矿物化学特征也指示支家桥橄榄辉长岩中的橄榄石为地幔捕捞晶。

4.2 单斜辉石的成因

4.2.1 母岩浆性质

单斜辉石作为岩浆岩中主要的造岩矿物之一, 对母岩浆的成分和结晶环境十分敏感, 其化学成分会随着母岩浆的演化而改变, 记录了与母岩浆成分演化特征的相关关键信息(Leterrier et al., 1982; 邱家壤和廖群安, 1987; 刘振轩等, 2023), 它的成分还受结晶时的温压环境控制, 因此可以限定其形成时母岩浆的温压条件(Putirka, 2008; Neave and Putirka, 2017; Neave et al., 2019a; 刘清等, 2023)。研究表明, 拉斑玄武岩较碱性玄武岩中的单斜辉石更亏损 Ca、Na(图 6a)。母岩浆中 Si 的饱和度会影响 Al^{IV} 的含量, 在单斜辉石结晶过程中当 Si 不饱和时, Al^{IV} 会进入四面体位置补充空缺, Si、Al 元素具有不相容性(图 6b), 因此单斜辉石成分变化可以判别母岩浆的性质(Kushiro, 1960; Le Bas, 1962; Seyler and Bonatti, 1994)。支

家桥橄榄辉长岩中未发生蚀变的单斜辉石成分投图结果显示, 投点多数落入亚碱性拉斑玄武岩区域, 少量落入碱性玄武岩区域, 母岩浆有从亚碱性系列向碱性系列演化的趋势(图 6)。

4.2.2 结晶温度和压力

本文利用 Wang X D et al.(2021)建立的单斜辉石单矿物温压计算模型, 对支家桥橄榄辉长岩中的单斜辉石进行温压条件计算, 结果见表 3。结果显示单斜辉石结晶时温度为 $1173 \sim 1194 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (平均为 $1183 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 压力为 $0.25 \sim 0.39 \text{ GPa}$ (平均为 0.31 GPa), 对应的深度为 $8 \sim 13 \text{ km}$ (平均为 10 km)。已有研究表明, 岩浆演化过程中随着温度升高, 单斜辉石的 $\text{Mg}^{\#}$ 会随着铁溶解度的增加而降低(牛晓露等, 2009; Luo B J et al., 2023)。因此, 高 $\text{Mg}^{\#}$ 的单斜辉石通常在较低的温度和压力下结晶, 而低 $\text{Mg}^{\#}$ 的辉石则在较高的温度和压力下结晶。支家桥橄榄辉长岩中单斜辉石中 $\text{Mg}^{\#}$ (82.52 ~ 85.95)变化范围较小, 暗示单斜辉石的结晶条件较稳定。

研究表明, 单斜辉石中 Al 对压力变化十分敏

表2 支家桥橄榄辉长岩中单斜辉石化学组成电子探针分析结果(wt.%)及相关参数

Table 2 Electron microprobe analysis results of chemical composition (wt.%) and related parameters of clinopyroxene in olivine gabbro of Zhijiaqiao

	ZJQ16-2-1	ZJQ16-2-2	ZJQ16-2-3	ZJQ16-2-4	ZJQ16-2-5	ZJQ16-2-6	ZJQ16-2-7	ZJQ16-2-8	ZJQ16-2-9	ZJQ16-2-10
SiO ₂	51.78	51.13	52.49	51.81	52.43	53.07	51.86	51.89	51.97	52.3
TiO ₂	0.53	0.55	0.4	0.56	0.48	0.26	0.55	0.51	0.55	0.41
Al ₂ O ₃	3.86	4.61	2.96	3.93	3.22	2.49	3.65	3.85	3.79	3.03
Cr ₂ O ₃	0.14	0.11	0.03	0.21	0.23	0.09	0.09	0.03	0.18	0.11
FeO	5.24	5.69	4.83	5.8	5.33	5.27	5.72	5.47	6.99	5.28
MnO	0.15	0.18	0.11	0.16	0.16	0.17	0.2	0.16	0.2	0.17
MgO	15.55	15.27	15.48	15.63	15.54	16.29	15.97	15.2	17.24	15.57
CaO	22.36	21.92	23.37	21.4	22.51	22.34	21.71	22.38	18.62	22.9
Na ₂ O	0.28	0.27	0.15	0.24	0.25	0.24	0.25	0.28	0.22	0.2
K ₂ O	0	0.01	0	0	0	0.02	0	0.02	0.01	0.01
Total	99.9	99.75	99.81	99.74	100.15	100.22	100.01	99.77	99.82	100
Si	1.9	1.88	1.93	1.9	1.93	1.95	1.91	1.91	1.91	1.92
Al ^{IV}	0.1	0.12	0.07	0.1	0.07	0.05	0.09	0.09	0.09	0.08
Al ^{VI}	0.07	0.08	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.05
Ti	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
Cr	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0
Fe ³⁺	0.02	0	0	0	0.03	0.07	0.03	0	0.03	0.01
Fe ²⁺	0.14	0.17	0.15	0.18	0.13	0.09	0.14	0.17	0.19	0.15
Mn	0	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.85	0.84	0.85	0.86	0.85	0.89	0.87	0.83	0.94	0.85
Ca	0.88	0.86	0.92	0.84	0.89	0.88	0.85	0.88	0.73	0.9
Na	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wo	46.39	45.92	47.93	44.78	46.5	45.37	44.73	46.7	38.62	46.91
En	44.89	44.5	44.18	45.5	44.66	46.02	45.78	44.14	49.76	44.37
Fs	8.72	9.58	7.9	9.72	8.84	8.61	9.5	9.17	11.63	8.71
Mg#	85.83	84.84	85.23	82.52	85.83	84.84	85.23	82.52	84.04	85.95

感, Wass(1979)认为其Al^{IV}与Al^{VI}之间的关系可以判别岩浆岩形成时的不同压力条件。我们将支家桥地区橄榄辉长岩中单斜辉石的Al^{IV}与Al^{VI}值投点到图7a,发现样品全部落入中压区域。Soesoo(1997)根据大量实验数据并结合多元统计的方法,对单斜辉石元素成分进行分析,建立了单斜辉石结晶温压变化范围。利用Soesoo(1997)提出的经验公式,对支家桥橄榄辉长岩的结晶压力进行判别。在X_{pt}-Y_{pt}图中,单斜辉石结晶的压力在0.2~0.5 GPa区域(图7b),与表3计算结果相符。

4.2.3 岩浆氧逸度与水含量

氧逸度、水含量与岩浆体系密切相关,是探究岩浆过程、结晶顺序和矿物类型的重要参数(Cameron and Papike, 1981; Jayasuriya et al., 2004; 王锦团等, 2020)。熔体中Fe³⁺/Fe²⁺对岩浆氧逸度变化较为敏感,单斜辉石中Fe³⁺可以代替八面体

位置中的其它三价元素(如Ti、Al^{VI}、Cr),其含量取决于Al^{IV}的含量。因此,可以通过分析单斜辉石的Al^{VI}+2Ti+Cr与Al^{IV}+Na之间的协变关系来限定其结晶时的氧逸度环境(Kuritani et al., 2014; 蔡晓芸等, 2024)。本文中单斜辉石样品多数落在平衡界线(Fe³⁺=0)下方(图8),指示单斜辉石是在相对较低的氧逸度环境中结晶。此外,支家桥橄榄辉长岩中存在角闪石和云母等含水矿物,表明母岩浆含水量较高。本文利用上述计算所得的岩浆温度和压力,采用Perinelli et al.(2016)改进后的基于单斜辉石不同组分来反演玄武质岩浆的湿度计来估算母岩浆的含水量:

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{melt}}(\%) = a\text{DiHd} + b\text{EnFs} + c\text{CaTs} + d\text{Jd} + e\text{CaTi} + f\text{InP} + g\text{T} + k$$

上式中参数a=39.60, b=29.48, c=41.76, d=39.58, e=0.44, f=0.14, g=-0.01, k=-27.53, P单位为MPa, T单位为℃,其中组成单斜辉石矿物的基本

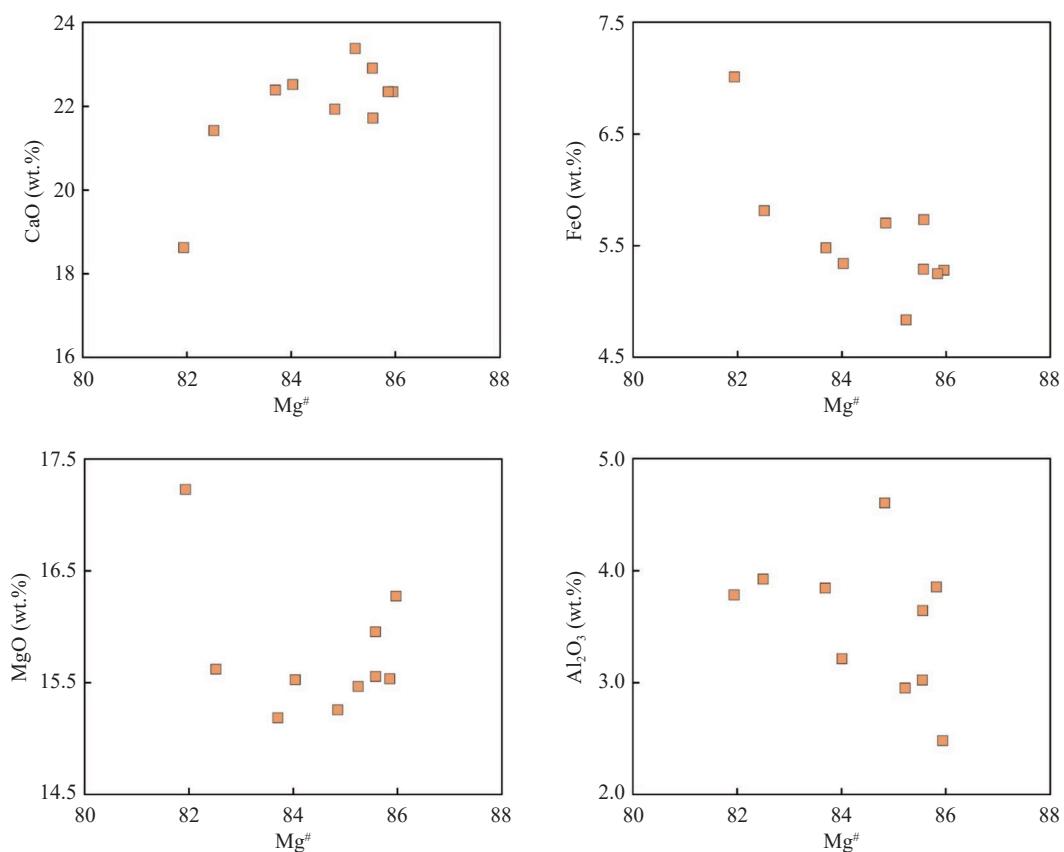
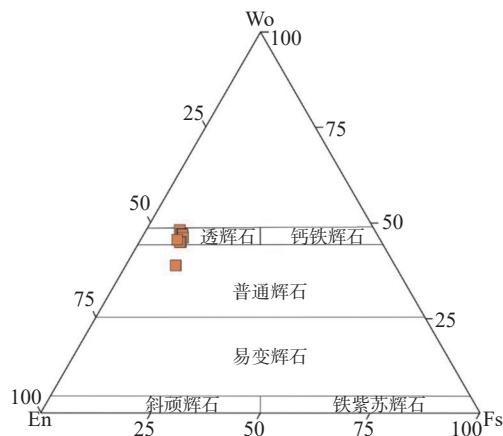
图3 支家桥橄榄辉长岩单斜辉石Mg[#]值与主要氧化物的关系图Fig. 3 Relationships between Mg[#] values and major oxides of clinopyroxene in the Zhijiaqiao olivine gabbro

图4 支家桥橄榄辉长岩单斜辉石分类图解

Fig. 4 Classification diagram of clinopyroxene in the Zhijiaqiao olivine gabbro

底图据 Morimoto et al. (1988)

组分(DiHd、EnFs、CaTs、Jd 和 CaTi)采用 Putirka (1999)提出的单斜辉石组分划分方法计算。计算结果(表3)显示,支家桥橄榄辉长岩母岩浆含水量介于 2.1%~2.7% 之间,在岛弧玄武岩水含量(2.0%~8.0%, Wallace, 2005)变化范围内,远高于洋

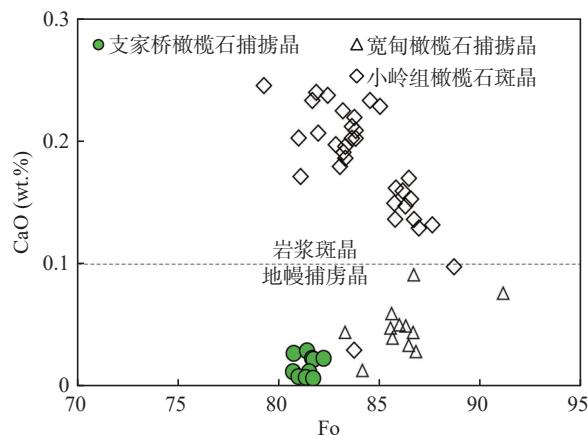


图5 支家桥橄榄辉长岩橄榄石Fo-CaO关系图

Fig. 5 Fo vs CaO for olivine phenocrysts in the Zhijiaqiao olivine gabbro
支家桥橄榄石捕掳晶为本文数据;宽甸和小岭组
橄榄石数据引自张超等(2022)

中脊玄武岩(0.1%~0.3%)和洋岛玄武岩(0.3%~1.0%)的水含量(Saal et al., 2002)。Xu Z et al. (2014)指出岩浆的结晶分异过程会使熔体中的水含量由~0.6%上升至3.5%~6.7%,而单斜辉石

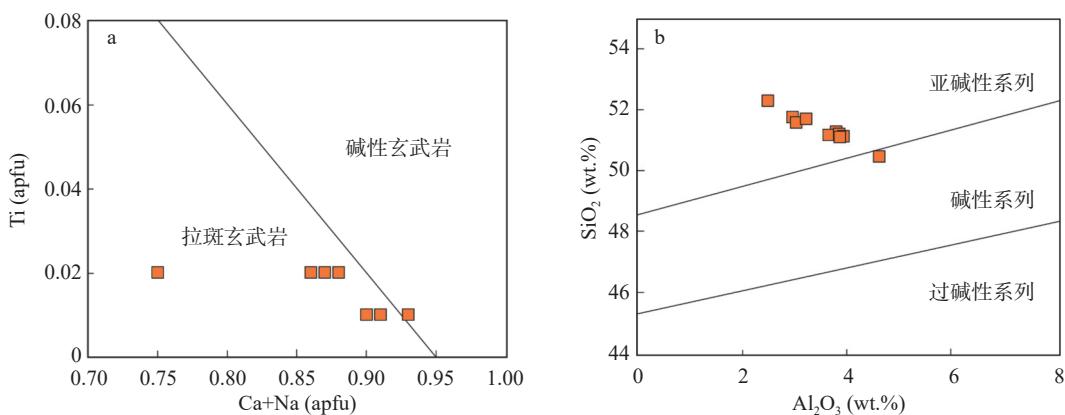


图 6 支家桥橄榄辉长岩单斜辉石岩浆系列判别图解

Fig. 6 Classification diagrams of clinopyroxene parent magma series for the Zhijiaqiao olivine gabbro

a. (Ca+Na)- Ti 图解(Leterrier et al., 1982); b. Al_2O_3 - SiO_2 图解(Le Bas, 1962); apfu: 单位分子原子数

表 3 支家桥橄榄辉长岩中单斜辉石结晶时温度、压力

Table 3 Temperature and pressure of clinopyroxene crystallization in Zhijiaqiao olivine gabbro

样号	T(℃)	P(GPa)	H_2O (wt.%)	H(km)
ZJQ16-2-1	1183.2	0.30	2.6	10
ZJQ16-2-2	1178.1	0.33	2.5	11
ZJQ16-2-4	1181.2	0.31	2.1	10
ZJQ16-2-5	1179.6	0.25	2.4	8
ZJQ16-2-6	1193.5	0.30	2.6	10
ZJQ16-2-7	1173.1	0.25	2.3	8
ZJQ16-2-8	1184.1	0.33	2.7	11
ZJQ16-2-9	1187.9	0.39	2.7	13

注: 假定1 GPa对应33 km深度; 温压计算公式据Wang X D et al.(2021).

是岩浆早期结晶的矿物, 结晶时间仅晚于橄榄石, 因此岩浆中较高的水含量不是矿物结晶分异所

致, 而是岩浆源区本身富水。

4.3 构造背景探讨

已有研究表明, 单斜辉石成分与岩浆起源和构造背景息息相关(Leterrier et al., 1982; 薛胜超等, 2015), 尤其是根据单斜辉石中 SiO_2 、 TiO_2 及 Al_2O_3 等元素构建的 F_1 - F_2 双因子判别图解, 可为构造-岩浆活动提供重要证据(Nisbet and Pearce, 1977)。此外, Aparicio(2010)基于单斜辉石化学组分(Si、Fe原子数)的比例关系, 识别玄武质岩浆的构造环境, 以区分板内和俯冲带火山作用。例如, 九州-帕劳脊南段玄武岩中的单斜辉石具有火山弧玄武岩和洋底玄武岩特征, 指示其与俯冲带岩浆作用相关(图 9)。本文单斜辉石样品在 F_1 -

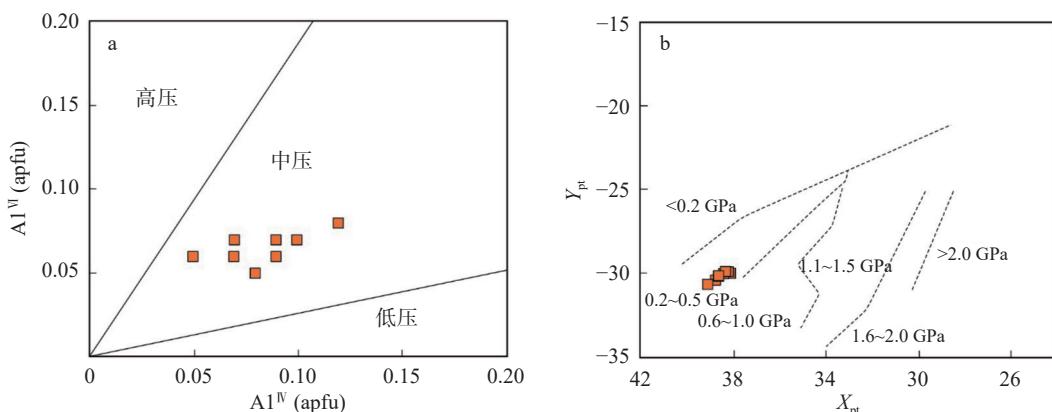


图 7 支家桥橄榄辉长岩单斜辉石结晶压力判别图

Fig. 7 Determination of clinopyroxenes crystallization pressures for the Zhijiaqiao olivine gabbro

a. Al^{IV} - Al^{VII} 判别图(底图据 Aoki ,1964); b. $X_{\text{pt}}-Y_{\text{pt}}$ 判别图(底图据 Soesoo et al., 1997); apfu: 单位分子原子数图 b 中 X_{pt} 、 Y_{pt} 计算公式分别为: $X_{\text{pt}} = 0.446\text{SiO}_2 + 0.187\text{TiO}_2 - 0.404\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.346\text{FeO} - 0.052\text{MnO} + 0.309\text{MgO} + 0.431\text{CaO} - 0.446\text{Na}_2\text{O}$;

$$Y_{\text{pt}} = -0.369\text{SiO}_2 + 0.535\text{TiO}_2 - 0.317\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.323\text{FeO} + 0.235\text{MnO} - 0.516\text{MgO} - 0.167\text{CaO} - 0.153\text{Na}_2\text{O}.$$

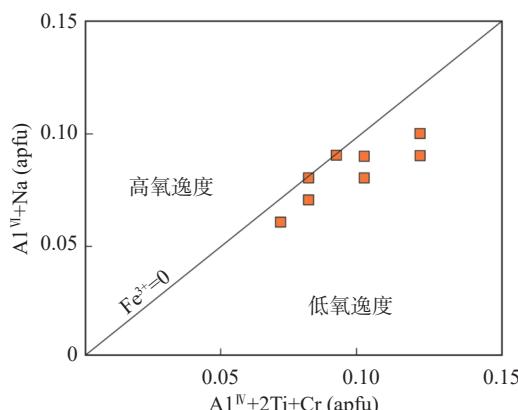


图8 支家桥橄榄辉长岩单斜辉石氧逸度判别图

Fig. 8 Discrimination for oxygen fugacity of clinopyroxenes in the Zhijiaqiao olivine gabbro

底图据 Kuritani et al. (2014); apfu: 单位分子原子数

F_2 双因子判别图解(图 9a)中,多数落入火山弧玄武岩(VAB)区域内,少部分落入火山弧玄武岩和洋底玄武岩(VAB+OFB)范围内。在 Si-Fe 判别图解(图 9b)中,本文中单斜辉石全部落入俯冲带岩浆作用区域。结合前文对单斜辉石母岩浆氧逸度和含水量的判别,在岩浆演化早期,岩浆源区具有较低的氧逸度和较富水的特征。因此,我们认为单斜辉石母岩浆的源区可能受到过俯冲带流体的交代。

支家桥地区位于华夏地块内部,江绍断裂带与政和-大浦断裂带之间,经历了从新元古代至新

生代的岩浆-构造作用。产于该区的橄榄辉长岩主要造岩矿物为单斜辉石、斜长石、橄榄石和角闪石,副矿物有金云母、黄铁矿和磷灰石等。橄榄石为浑圆粒状,边缘具有蛇纹石化的蚀变边,结合其 Ti、Ca 和 Ni 的含量,推断橄榄石为地幔捕虏晶。单斜辉石计算结果表明橄榄辉长岩母岩浆为亚碱性拉斑玄武质岩浆,结晶于中下地壳(温压条件为 1173.1~1193.5 °C、0.25~0.39 GPa)。此外,单斜辉石的氧逸度和水含量的计算结果指示,岩浆演化早期岩浆源区具有较低的氧逸度和富水的特征。我们认为支家桥橄榄辉长岩可能是受俯冲流体交代过的岩石圈地幔在新生代伸展背景下发生减压熔融,形成橄榄辉长岩的母岩浆,母岩浆上升侵位于中下地壳的产物。

5 结论

(1) 支家桥橄榄辉长岩主要造岩矿物为单斜辉石、斜长石、橄榄石和角闪石,副矿物有金云母、黄铁矿和磷灰石等,显微特征及矿物化学特征指示橄榄石为地幔捕虏晶。角闪石和云母等含水矿物的出现以及单斜辉石的高水含量(2.1%~2.7%),指示其母岩浆具有富水的特征。

(2) 支家桥橄榄辉长岩中单斜辉石成分和

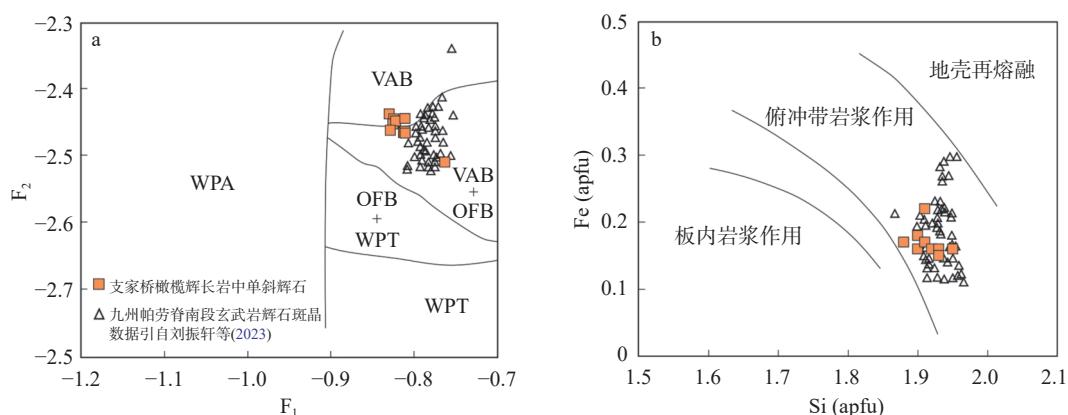


图9 支家桥橄榄辉长岩单斜辉石化学组分构造背景判别图解

Fig. 9 Diagram for discriminating structural background on the basis of the chemical composition of clinopyroxene from olivine gabbro in Zhijiaqiao

a. F1-F2 图解(底图据 Nisbet and Pearce, 1977); b. Si-Fe 图解(底图据 Aparicio, 2010).

apfu: 单位分子原子数. WPT: 板内拉斑玄武岩, WPA: 板内碱性玄武岩, VAB: 火山弧玄武岩, OFB: 洋底玄武岩;

$$F_1 = -0.012\text{SiO}_2 - 0.0807\text{TiO}_2 + 0.0026\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.0012\text{FeO} - 0.0026\text{MnO} + 0.0087\text{MgO} - 0.0128\text{CaO} - 0.0419\text{Na}_2\text{O};$$

$$F_2 = -0.0469\text{SiO}_2 - 0.0818\text{TiO}_2 - 0.0212\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.0041\text{FeO} - 0.1435\text{MnO} - 0.0029\text{MgO} + 0.0085\text{CaO} + 0.016\text{Na}_2\text{O}$$

结晶环境(压力 0.25~0.39 GPa, 温度 1173~1193 °C)指示橄榄辉长岩母岩浆为钙碱性玄武质岩浆, 结晶于中下地壳的低氧逸度环境。

(3)结合区域地质背景和橄榄辉长岩母岩浆成分以及源区富水的特征, 认为支家桥橄榄辉长岩可能是受俯冲流体交代过的岩石圈地幔在新生代伸展背景下发生减压熔融, 形成的母岩浆上升侵位于中下地壳的产物。

感谢编辑和两位审稿专家对本文提出的宝贵修改意见和建议!

参考文献:

- 蔡晓芸,徐扬,杨振宁,刘雨,李定华,陈宇.2024.扬子北缘大洪山地区新元古代辉长绿岩中单斜辉石成因及其构造意义 [J]. 岩石学报,40(11):3552-3567.
- 陈可,邵拥军,刘忠法,张俊柯,李永顺,陈雨莹.2024.岩浆因素对中国东部铜陵矿集区差异性矿化的控制作用:来自角闪石、斜长石矿物学证据 [J]. 地学前缘,31(3):199-217.
- 段雪鹏.2019.东昆仑夏日哈木含铜镍矿镁铁-超镁铁岩成因矿物学研究 [D]. 中国地质科学院博士学位论文.
- 高文彬.2021.甘肃柳园地区西南山岩体地质特征及岩石地球化学研究 [D]. 长安大学硕士学位论文.
- 胡开明.2001.江绍断裂带的构造演化初探 [J]. 浙江地质,(2):1-11.
- 姜常义,凌锦兰,周伟,杜玮,王子玺,范亚洲,宋艳芳,宋忠宝.2015.东昆仑夏日哈木镁铁质-超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景 [J]. 岩石学报,31(4):1117-1136.
- 江西省地质调查研究院.2009.江西1:5万桃墅店、大庄村、余干县、古楼埠、江埠、社赓幅区域地质调查报告 [R].
- 孔会磊,栗亚芝,李金超,贾群子,国显正,王宇,姚学钢.2021.东昆仑希望沟橄榄辉长岩的岩石成因:地球化学、锆石U-Pb年龄与Hf同位素制约 [J]. 中国地质,48(1):173-188.
- 李建华,董树文,赵国春,张岳桥,辛宇佳,王金铭,卢运可.2024.华南晚中生代大陆变形、深部过程及动力学 [J]. 地质学报,98(3):829-861.
- 李兆鼐,权恒,李之彤.2003.中国东部中新生代火成岩及其深部过程 [M]. 北京:地质出版社.
- 刘凯,厉子龙,徐维光,叶海敏,赵希林,胡逸州,周静,毛建仁.2016.华南中生代岩浆岩时空分布和迁移与古太平洋板块俯冲过程 [J]. 矿物岩石地球化学通报,35(6):1141-1155.
- 刘清,郭国林,张胜了,巫建华,严兆彬,陶继华,王凯兴.2023.浙江江山上墅组玄武粗安岩中单斜辉石环带特征及指示意义 [J]. 地质学报,97(5):1447-1462.
- 刘振轩,鄢全树,刘焱光,杨刚,石学法.2023.九州-帕劳脊南段基底玄武岩的单斜辉石矿物化学及成因意义 [J]. 海洋学报,45(6):75-92.
- 马博骋,钱壮志,Keays Reid,徐刚,段俊,焦建刚,高文彬,陈阳阳.2023.甘-新北山地区二叠纪镁铁-超镁铁质岩体造岩矿物化学特征及其岩石学指示 [J]. 岩石学报,39(4):1095-1116.
- 牛晓露,陈斌,马旭.2009.河北矾山杂岩体中单斜辉石的研究 [J]. 岩石学报,25(2):359-373.
- 秦社彩,范蔚茗,郭锋.2019.江绍断裂带晚中生代镁铁质火山岩成因及其深部过程意义 [J]. 岩石学报,35(6):1892-1906.
- 邱家骥,廖群安.1987.中国东部新生代玄武岩中单斜辉石巨晶的主要特征及成因信息 [J]. 岩石矿物学杂志,6(1):56-64.
- 舒良树.2012.华南构造演化的基本特征 [J]. 地质通报,31(7):1035-1053.
- 孙涛.2006.新编华南花岗岩分布图及其说明 [J]. 地质通报,25(3):332-335.
- 王锦团,熊小林,陈伊翔,黄芳芳.2020.俯冲带氧逸度研究:进展和展望 [J]. 中国科学:地球科学,63(12):1952-1968.
- 王新毓,索艳慧,李三忠,曹现志,李玺瑶,周洁,王鹏程,金宠.2020.华南东部陆缘新生代隆升历史及其动力学机制 [J]. 岩石学报,36(6):1803-1820.
- 吴建亮,尹显科,王波,刘文,雷传扬,李威,张伟.2019.藏北阿翁错地区中基性脉岩年代学、地球化学特征及其板内伸展构造作用 [J]. 中国地质,46(6):1356-1371.
- 夏林圻,李向民,马中平,徐学义,夏祖春.2010.青藏高原新生代火山作用与构造演化 [J]. 西北地质,43(1):1-25.
- 薛胜超,秦克章,唐冬梅,毛亚晶,姚卓森.2015.东疆二叠纪镁铁-超镁铁岩体中辉石的成分特征及其对成岩和Ni-Cu成矿的指示 [J]. 岩石学报,31(8):2175-2192.
- 张超,马强,郑建平,洪路兵,庞崇进,王翠翠,毋雅京,朱律运.2022.辽东中-新生代玄武岩的橄榄石斑晶和捕虏晶氧同位素组成及其岩石圈地幔演化启示 [J]. 地质学报,96(12):4211-4223.
- 张柳毅,李霓,Dejan Prelevic.2016.橄榄石微量元素原位分析的现状及其应用 [J]. 岩石学报,32(6):1877-1890.
- 张少兵,吴鹏,郑永飞.2019.罗迪尼亚超大陆聚合在华南陆块北缘的镁铁质岩浆岩记录 [J]. 地球科学,44(12):4157-4166.
- 张胜了,郭国林,巫建华,武勇,刘清,严文亚,李昌龙,姜智

- 东, 尊珠桑姆. 2024. 浙西里垄正长岩 SIMS 镐石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质论评, 70(2):476-498.
- 张晓晖, 翟明国. 2010. 华北北部古生代大陆地壳增生过程中的岩浆作用与成矿效应 [J]. 岩石学报, 26(5):1329-1341.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展 [J]. 地球学报, 33(3): 257-279.
- 左祖发, 徐喆, 刘杨, 黄志忠, 刘邦秀, 马振兴, 徐祖丰. 2017. 江西余干支家桥地区镁铁质岩体的 LA-ICP-MS 镐石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 40(4):306-313.
- Aoki K I. 1964. Clinopyroxenes from alkaline rocks of Japan[J]. American Mineralogist, 49(9-10): 1199-1223.
- Aparicio A. 2010. Relationship between clinopyroxene composition and the formation environment of volcanic host rocks[J]. The IUP Journal of Earth Sciences, 4(3): 34-44.
- Ballhaus C, Berry R F, Green D H. 1991. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: Implications for the oxidation state of the upper mantle[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 107(1): 27-40.
- Barnes S J, Roeder P L. 2001. The Range of Spinel Compositions in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks[J]. Journal of Petrology, 42: 2279-2302.
- Cameron M, Papike J J. 1981. Structural and chemical variations in pyroxenes[J]. American Mineralogist, 66(1-2): 1-50.
- De H J, Gall L, Cornell D H. 2010. Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry[J]. Chemical Geology, 270(1-4): 196-215.
- Foley S F, Prelevic D, Rehfeldt T, Jacob D E. 2013. Minor and trace elements in olivines as probes into early igneous and mantle melting processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 363: 189-191.
- Jayasuriya K D, O'Neill H S C, Berry A J, Campbell S J. 2004. A Mössbauer study of the oxidation state of Fe in silicate melts[J]. American Mineralogist, 89(11-12): 1597-1609.
- Kamenetsky V S, Elburg M, Arculus R, Thomas R. 2006. Magmatic origin of low-Ca olivine in subduction-related magmas: Co-existence of contrasting magmas[J]. Chemical Geology, 233(3-4): 346-357.
- Kuritani T, Yoshida T, Kimura J I, Hirahara Y, Takahashi T. 2014. Water content of primitive low-K tholeiitic basalt magma from Iwate Volcano, NE Japan Arc: Implications for differentiation mechanism of frontal-arc basalt magmas[J]. Mineralogy and Petrology, 108(1): 1-11.
- Kushiro I. 1960. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks[J]. American Journal of Science, 258(8): 548-554.
- Le Bas M J. 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage[J]. American Journal of Science, 260(4): 267-288.
- Leterrier J, Maury R C, Thonon P, Girard D, Marchal M. 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinity of paleovolcanic series[J]. Earth and Planetary Science Letters, 59(1): 139-154.
- Li C S, Thakurta J, Ripley E M. 2012. Low-Ca contents and kink-banded textures are not unique to mantle olivine: Evidence from the Duke Island complex, Alaska[J]. Mineralogy and Petrology, 104(3-4): 147-153.
- Li X H, Wang X C, Zhou K F, Qiu J S, Zhao X X. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. Precambrian Research, 174: 117-128.
- Long X Y, Tang J, Xu W L, Sun C Y, Luan J P, Xiong S and Zhang X M. 2023. Trace element and Nd isotope analyses of apatite in granitoids and metamorphosed granitoids from the eastern Central Asian Orogenic Belt: Implications for petrogenesis and post-magmatic alteration[J]. Geoscience Frontiers, 14: 101517.
- Louks R R. 1990. Discrimination of ophiolitic from non-ophiolitic ultramafic-mafic alkaliclochloths in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene[J]. Geology, 18(4): 346-349.
- Luo B J, Wang Z C, Song J L, Qian Y Q, He Q, Li Y H, James W, Frédéric M, Xiao L, Harry Becker, Huang B X, Ruan B, Hu Y X, Pan F B, Xu C, Liu W L, Zong K Q, Zhao J W, Zhang W, Hu Z C, She Z B, Wu X, Zhang H F. 2023. The magmatic architecture and evolution of the Chang'e-5 lunar basalts[J]. Nature Geoscience, 16: 301-308.
- Meng L F, Li Z X, Chen H L, Li X H, Wang X C. 2012. Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China Block support the

- flat-slab subduction model[J]. *Lithos*, 132: 127-140.
- Morimoto N, Fabries J, Ferguson A K, Ginzburg I V, Ross M, Seifert F A, Zussman K, Aoko, Gottardi, G. 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 52(367): 535-550.
- Neave D A, Putirka K D. 2017. A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones[J]. *American Mineralogist*, 102(4): 777-794.
- Neave D A, Namur O, Shorttle O, Holtz F. 2019a. Magmatic evolution biases basaltic records of mantle chemistry towards melts from recycled sources[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 520: 199-211.
- Nisbet E G, Pearce J A. 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149-160.
- Perinelli C, Mollo S, Gaeta M, Cristofaro S P D, Palladino D M, Armienti G, Scarlato, Putirka K D. 2016. An improved clinopyroxene-based hygrometer for Etnean magmas and implications for eruption triggering mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 101(12): 2774-2777.
- Putirka K D. 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 61-120.
- Putirka K. 1999. Clinopyroxene + liquid equilibria to 100kbar and 2450K[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135(2-3): 151-163.
- Saal A E, Hauri E H., Langmuir C H, Perfit M R. 2002. Vapour undersaturation in primitive mid-ocean-ridge basalt and the volatile content of Earth's upper mantle[J]. *Nature*, 419(6906): 451-455.
- Seyler M, Bonatti E. 1994. Na, Al^{IV} and Al^{VII} in clinopyroxenes of subcontinental and suboceanic ridge peridotites: A clue to different melting processes in the mantle?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 122(3-4): 281-289.
- Shu L S, Yao J L, Wang B, Michel F, Jacques C, Chen Y. 2021. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block[J]. *Earth-Science Reviews*, 216: 103596.
- Soesoo A. 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation PT estimations[J]. *GFF*, 119(1): 55-60.
- Streck M J. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 595-622.
- Wallace, P. J. 2005. Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140(1-3): 217-240.
- Wang X D, Hou T, Wang M, Zhang C, Zhang Z C, Pan R, Marxer F, Zhang H L. 2021. A new clinopyroxene thermometer for mafic to intermediate magmatic systems[J]. *European Journal of Mineralogy*, 33(5): 621-637.
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Wang R C, Qiu J S, O'Reilly S Y, Xu X, Liu X M, Zhang G L. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Research*, 159(1-2): 117-131.
- Wass S Y. 1979. Multiple origins of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks[J]. *Lithos*, 12(2): 115-132.
- Xu Z, Zheng Y F, Zhao Z F, Zhao Z F, Gong B. 2014. The hydrous properties of subcontinental lithospheric mantle: Constraints from water content and hydrogen isotope composition of phenocrysts from Cenozoic continental basalt in North China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 285-302.
- Yu K Z, Liu Y S, Foley Stephen F, Hu Z C, Zong K Q, Chen C F and Shu C T. 2021. Reconstruction of primary alkaline magma composition from mineral archives: Decipher mantle metasomatism by carbonated sediment[J]. *Chemical Geology*, 577: 120279.
- Zhao G C, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Research*, 222: 13-54.
- Zhao G C. 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction[J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1173-1180.