

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.01.004

## 浙江江山上墅组粗安岩中斜长石环带特征及其成因

刘清<sup>1,2</sup>, 张胜了<sup>1,2,3</sup>, 郭国林<sup>1\*</sup>, 巫建华<sup>1,2</sup>, 严文亚<sup>1,2</sup>

LIU Qing<sup>1,2</sup>, ZHANG Sheng-Liao<sup>1,2,3</sup>, GUO Guo-Lin<sup>1\*</sup>, WU Jian-Hua<sup>1,2</sup>, YAN Wen-Ya<sup>1,2</sup>

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013; 2. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013;  
3. 江西省地质调查勘查院地质环境监测所, 江西南昌 330006

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. Geological Environment Monitoring Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330006, Jiangxi, China

**摘要:**火成岩中斜长石的环带结构和成分特征与岩石成因密切相关,可以反映岩浆的压力、温度、熔体成分和水含量。本文对浙江江山新元古代上墅组粗安岩中具环带结构的斜长石开展了详细的矿物学研究,以揭示蕴含的成因信息,为区域岩浆演化过程提供约束。显微镜下观察斜长石可分为斑晶和基质两种,其中斑晶可见明显环带特征,背散射电子图像显示核部多呈熔蚀的板状且较宽较暗,边部较窄较明亮,在核部与边部边界处有较多的钛铁矿微晶。电子探针分析表明斜长石核部相对富K、Na、Si,斜长石  $An([100 \times Ca/(Ca+Na)])=44-52$ ,属于拉长石—中长石;边部相对富Ca、Al、Fe、Mg,  $An=54-66$ ,属于拉长石,呈现反环带结构。显微镜下观察发现斜长石边部较窄且含有大量钛铁矿包体,反映结晶环境突变,同时斜长石核部多呈现熔蚀的板状,指示除了结晶环境的突变外,岩浆体系中还有外来富钙质岩浆的加入,因此反环带结构可能是岩浆混合的结果。区域资料显示浙江境内的上墅组主要形成于新元古代华夏与扬子两大陆块碰撞拼贴之后的陆内拉张构造背景,为一套双峰式火山岩。因此,本文研究的斜长石反环带结构可能是幔源的基性岩浆上升注入到经下地壳重熔形成的偏酸性浅部岩浆房后发生岩浆混合作用形成的。

**关键词:**斜长石;反环带;岩浆混合;上墅组;浙江江山

中图分类号:P581

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2023)01-0054-10

**Liu Q, Zhang S L, Guo G L, Wu J H and Yan W Y. 2023. Characteristics and Petrogenesis of the Zoned Plagioclase in Trachyandesite from the Shangshu Formation, Jiangshan, Zhejiang Province. *South China Geology*, 39(1):54-63.**

**Abstract:** The oscillatory zone and compositional characteristics of the plagioclase is closely related to petrogenesis, which can reflect the pressure, temperature, melt ingredients, and water content of the magma. In this paper, a detailed mineralogical study of the plagioclase with oscillatory zone in the Neoproterozoic Shangshu Formation has been carried out in order to reveal the petrogenesis and regional magmatic evolution. The plagioclase can be divided into phenocrysts and substrates under the microscope, and the phenocrysts have an obvious oscillatory zone, the core of which shows a corroded tabular with dark color in the backscattered electron image, but the edge is narrow and bright. The boundary between the core and the edge contains a large

收稿日期:2022-10-10;修回日期:2022-11-24

基金项目:国家自然科学基金项目(42262009,41762005)、核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(2020Z04)和东华理工大学研究生创新专项资金项目(DHYC-202216)

第一作者:刘清(1997—),女,硕士研究生,地质资源与地质工程专业,研究方向为矿物学,E-mail:lq07230918@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:gglobin@163.com

number of ilmenite microcrystals. Electron probed analysis results show that the plagioclase has a reverse zoning structure, of which the core is relatively rich in K, Na, and Si, with An ( $[100 \cdot \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na})]$ ) = 44~52, belonging to labradorite-andesine, while the edge is relatively rich in Ca, Al, Fe, and Mg, with An=54~66, belonging to labradorite. The reverse zoning structure of plagioclase is probably caused by magma mixing and temperature and pressure rapidly changing as the plagioclase core has a corroded tabular, but the edge is narrow and contains a high number of ilmenite inclusions, which indicate there exists the sudden crystalline environment change and external magma injection. Combined with the regional data, the Shangshu Formation is a set of bimodal volcanic rocks formed at the intracontinental tensional tectonic setting following the collision of the Cathaysia and Yangtze continents in the Neoproterozoic. It is suggested that the plagioclase with oscillatory zone is the result of magmatic mixing after the mantle-derived basic magma rises and injects into the slightly acidic shallow magma chamber, which is formed after the remelting of the lower crust.

**Key words:** plagioclase; reverse zonal structure; magma mixing; Shangshu Formation; the Jiangshan area, Zhejiang Province

岩浆混合作用是造成火成岩复杂性和多样性的重要原因,可为探索地壳演化、壳幔相互作用提供重要线索(李昌年等,1996;Gao P et al.,2016;牛漫兰等,2018)。按照混合方式和程度的不同,岩浆混合作用可分为化学混合与机械混合。机械混合作用形成的岩石一般在宏观上可见不均一现象,如岩体中广泛发育铁镁质暗色包体(Bonin,2004;谭陈诚等,2020;翟文建等,2020;雷传扬,2021);化学混合作用形成的岩石在结构上具有均一性,其判别主要通过全岩地球化学特征和典型的矿物组成(张旗等,2007;王玉往等,2012)。斜长石被认为是反演岩浆演化过程重要的指示矿物(Grove et al.,1984),其环带以及特征晶体结构(如熔蚀结构,固体/熔体包裹体等)能够记录岩浆温度、压力和组分的变化(Nakamura and Shimakita,1998;Hammer and Rutherford,2002;Ustunisik et al.,2014),还能利用晶体的熔蚀现象、环带结构和 An 值变化等(Tepley et al.,2000;牛之建等,2014;董欢等,2017)约束岩浆混合等演化过程(Ginibre et al.,2002)。

笔者在浙江江山进行区域地质调查过程中发现上墅组中发育一套粗安岩,呈薄层状产于上墅组的流纹质火山岩中,岩石手标本可见斜长石斑晶发育,显微镜与背散射电子(BSE)图像下发现斑晶有明显的核-边环带结构特征,核部呈熔蚀的板状,核-边界线附近分布较多的不透明矿物微晶,这些具环带结构的斜长石斑晶可能记录了复杂的岩浆

演化过程,具有岩石成因指示意义。基于此,我们对这些具核-边环带结构的斜长石斑晶开展了详细的矿物学研究,以期通过单矿物的显微结构和成分变化特征探讨区域岩浆动力学过程,为华南新元古代区域岩浆构造演化过程研究提供新的矿物学资料。

## 1 区域地质背景

华南地块是由扬子板块和华夏板块拼合而成(Dong C W et al.,2007;王孝磊等,2017;Shu L S,2020),江南造山带被认为是扬子板块与华夏板块间的碰撞对接带(Yao J L et al.,2016;Zhao Z B et al.,2018;杨世平等,2021;陆建军等,2022)(图1a)。江山-绍兴断裂带是浙江境内分隔扬子地块与华夏地块的深大断裂,断裂带内广泛发育的新元古代岩浆岩保留了两大板块碰撞拼贴及后期裂解等过程的信息,带内主要发育有火山岩和S型、A型花岗岩(Zheng Y F et al.,2008)。

新元古代上墅组火山岩系广泛分布于江山-绍兴断裂带的萧山-富阳和衢州-江山等地(图1b),各处的岩石组合特征有所差异。萧山地区上墅组包括下段中基性熔岩、火山碎屑岩及上段酸性熔岩夹少量火山碎屑岩,形成时代为 $850 \pm 40 \text{Ma}$ (徐步台和邱郁双,1994)。开化地区上墅组下段发育玄武安山岩和玄武岩,上段为流纹岩、流纹质凝灰岩,下段玄武



造。显微镜下可见斑晶矿物主要为单斜辉石(约15%)和斜长石(约5%)(图2a),基质约占80%,其中单斜辉石斑晶粒径约1~2 mm,呈半自形结构;斜长石粒径约3~5 mm,呈自形-半自形结构,发育聚片双晶,可见清晰的环带结构(图2b)。基质成分主

要为单斜辉石、斜长石和钛铁矿等,具粗面结构,可见长石微晶近似呈平行排列。在电子探针背散射电子图像中,斜长石斑晶明显发育核-边环带结构,核部呈熔蚀的板状(图2c),较宽较暗,边部窄而明亮,且含较多细小钛铁矿等矿物包裹体(图2c、d)。

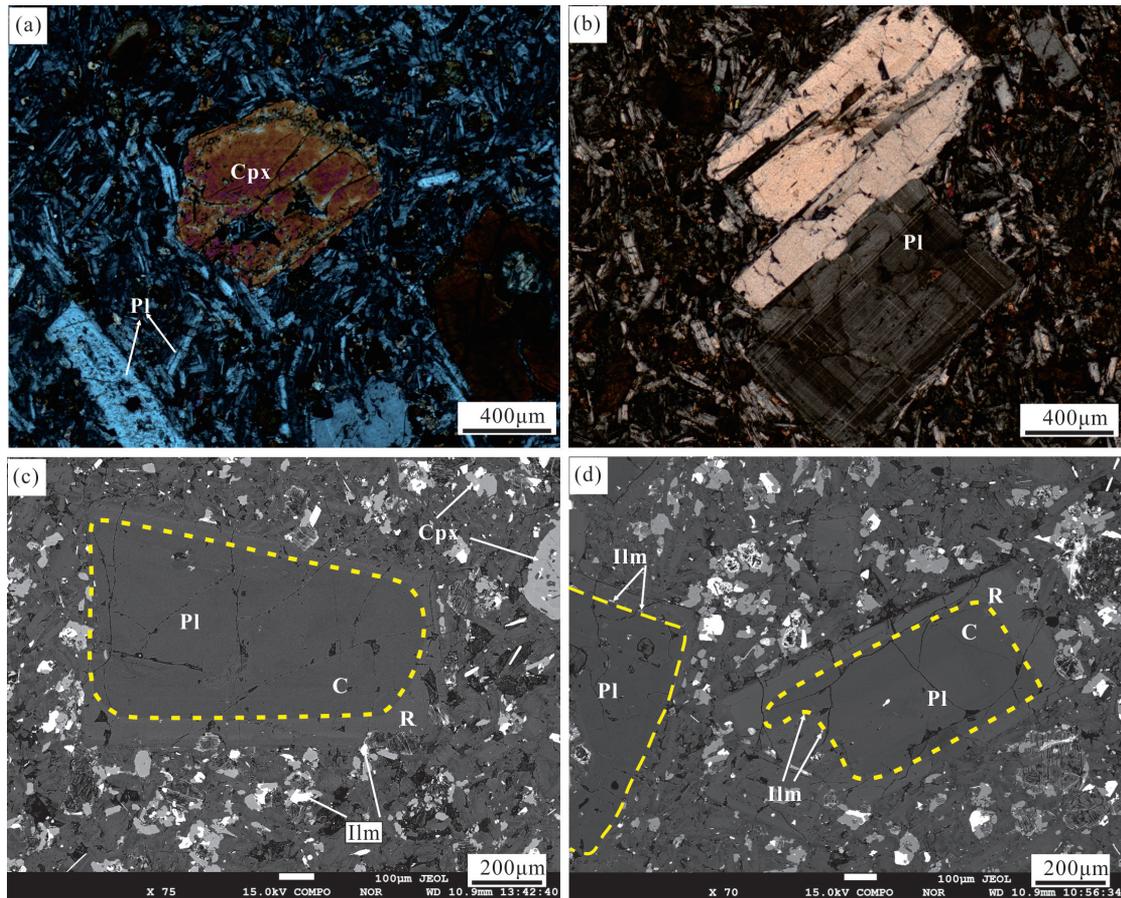


图2 上墅组粗安岩岩相学照片

Fig. 2 Micrographs and backscattered electron images of the trachyandesite in the Shangshu Formation

Pl. 斜长石; Cpx. 单斜辉石; Ilm. 钛铁矿; C. 核部; R. 边部

## 2.2 分析测试方法

样品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 15617-2002)([国家质量监督检验检疫总局, 2003](#))进行,加速电压 15kV,探针束流 20 nA,束斑直径 5 $\mu$ m,峰值计数时间设定为 20s,背景计数时间设定为 10s。原始数据采用在线 ZAF 方法校正,Fe、Mg 标样选用透辉石, Ca 和 Na

选用斜长石, Si 和 Al 选用硬玉, Cr 选用纯 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti 选用金红石, Mn 选用 MnO, Si、Ti、Al、Fe、Mg、Na、K、Cr、Mn 和 Ca 的相对精度为  $\pm 2\%$ 。

## 3 斜长石矿物化学特征

本次选择了两颗具典型环带结构的斜长石斑晶开展研究工作,斜长石的电子探针分析结果见表 1。江山上墅组粗安岩斜长石斑晶的核部到边部 SiO<sub>2</sub>、FeO<sup>T</sup>、CaO 和 Na<sub>2</sub>O 等化学成分存在一定差

异。样品JS16-3核部SiO<sub>2</sub>含量为56.20~57.30%，平均为56.73%；FeO<sup>T</sup>含量为0.29~0.31%，平均为0.30%；CaO含量为8.58~9.74%，平均为9.46%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为27.12~28.55%，平均为28.19%；Na<sub>2</sub>O含量为4.70~5.06%，平均为4.93%。边部SiO<sub>2</sub>含量为54.20~55.38%，平均为54.68%；FeO<sup>T</sup>含量为0.45%~0.49%，平均为0.47%；CaO含量为10.24~11.34%，平均为10.94%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为28.22~29.61%，平均为29.13%；Na<sub>2</sub>O含量为4.36~4.57%，平均为4.47%。样

品JS16-4核部SiO<sub>2</sub>含量为55.24~58.51%，平均为56.62%；FeO<sup>T</sup>含量为0.26~0.64%，平均为0.35%；CaO含量为8.11~10.32%，平均为9.39%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为27.25~28.55%，平均为28.06%；Na<sub>2</sub>O含量为4.79~5.89%，平均为5.12%。边部SiO<sub>2</sub>含量为51.35~52.57%，平均为51.89%；FeO<sup>T</sup>含量为0.41%~0.70%，平均为0.56%；CaO含量为12.45~12.77%，平均为12.66%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为30.19~30.37%，平均为30.25%；Na<sub>2</sub>O含量为3.41~3.91%，平均为3.74%。

表1 上墅组粗安岩中斜长石电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses of the plagioclase in trachyandesite of the Shangshu Formation(%)

测试点号	分析位置	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	An	Ab	Or
JS16-3-16	核部	56.47	0.04	28.54	0.31	0.01	0.04	9.74	4.7	0.59	100.43	51.44	44.89	3.68
JS16-3-17	核部	56.65	0.04	28.39	0.29	0.03	0.01	9.71	5.04	0.61	100.78	49.64	46.65	3.72
JS16-3-18	核部	56.2	0.03	28.41	0.29	0.04	0	9.69	4.88	0.65	100.23	50.21	45.75	4.03
JS16-3-19	核部	56.51	0.03	28.29	0.3	0.04	0.01	9.48	4.9	0.61	100.24	49.71	46.47	3.82
JS16-3-20	核部	57.11	0.04	28.55	0.3	0.03	0.02	9.73	5.06	0.65	101.54	49.49	46.55	3.96
JS16-3-21	核部	56.89	0.05	28.06	0.31	0	0	9.32	4.97	0.62	100.27	48.9	47.22	3.88
JS16-3-22	核部	57.3	0.04	27.12	0.3	0.07	0	8.58	4.96	0.73	99.18	46.57	48.71	4.73
JS16-3-23	边部	54.2	0.06	29.61	0.49	0.01	0	11.34	4.36	0.4	100.46	57.54	40.02	2.44
JS16-3-24	边部	54.21	0.05	29.56	0.46	0.01	0	11.25	4.42	0.39	100.35	57.06	40.6	2.33
JS16-3-25	边部	54.52	0.06	29.15	0.45	0.02	0.02	10.86	4.42	0.43	99.96	56.08	41.27	2.65
JS16-3-26	边部	54.63	0.05	29.03	0.49	0.01	0.01	10.88	4.51	0.46	100.06	55.53	41.66	2.81
JS16-3-27	边部	55.14	0.05	29.18	0.49	0.02	0	11.09	4.51	0.46	100.97	56.02	41.22	2.76
JS16-3-28	边部	55.38	0.08	28.22	0.47	0.03	0.01	10.24	4.57	0.47	99.46	53.68	43.41	2.92
JS16-4-1	核部	55.67	0.05	28.55	0.35	0.02	0	10.23	4.79	0.53	100.22	52.37	44.39	3.25
JS16-4-2	核部	55.24	0.12	28.5	0.64	0.03	0.01	10.32	5.09	0.49	100.43	51.3	45.8	2.9
JS16-4-3	核部	55.80	0.05	28.39	0.32	0.01	0	9.77	4.93	0.57	99.95	50.46	46.07	3.47
JS16-4-4	核部	55.70	0.06	28.42	0.29	0.02	0	9.95	4.87	0.54	99.88	51.3	45.41	3.3
JS16-4-5	核部	58.51	0.03	27.25	0.26	0.01	0	8.11	4.93	0.76	99.9	45.22	49.77	5.01
JS16-4-6	核部	57.05	0.03	27.96	0.3	0.02	0	9.16	5.89	0.66	101.13	44.45	51.72	3.83
JS16-4-7	核部	58.39	0.03	27.35	0.27	0.02	0.03	8.19	5.34	0.7	100.45	43.84	51.71	4.46
JS16-4-8	边部	52.57	0.05	30.37	0.41	0.02	0	12.73	3.41	0.29	99.84	66.16	32.06	1.78
JS16-4-9	边部	51.35	0.08	30.21	0.7	0.03	0	12.77	3.82	0.28	99.25	63.79	34.55	1.66
JS16-4-10	边部	51.87	0.05	30.19	0.48	0.05	0	12.45	3.84	0.31	99.25	62.97	35.14	1.89
JS16-4-11	边部	51.75	0.08	30.22	0.63	0.05	0	12.68	3.91	0.32	99.64	62.99	35.1	1.91

注: An=100×Ca/(Ca+Na)

在斜长石成分图(图3)中,两颗斜长石斑晶核部成分基本一致,为Ab<sub>44-52</sub>An<sub>44-52</sub>Or<sub>3-5</sub>,平均成分为Ab<sub>49</sub>An<sub>47</sub>Or<sub>4</sub>,落入中长石和拉长石区。但边部成分有一定的区别,JS16-3为Ab<sub>40-43</sub>An<sub>54-58</sub>Or<sub>2-3</sub>,平均成分为Ab<sub>41</sub>An<sub>56</sub>Or<sub>3</sub>,JS16-4为Ab<sub>32-35</sub>An<sub>63-66</sub>Or<sub>2</sub>,平均成分为Ab<sub>34</sub>An<sub>64</sub>Or<sub>2</sub>。两颗长石斑晶边部均落入拉长石

区(图3)。

## 4 讨论

### 4.1 斜长石环带成因

岩浆的成分、温度和压力条件会随岩浆演化过

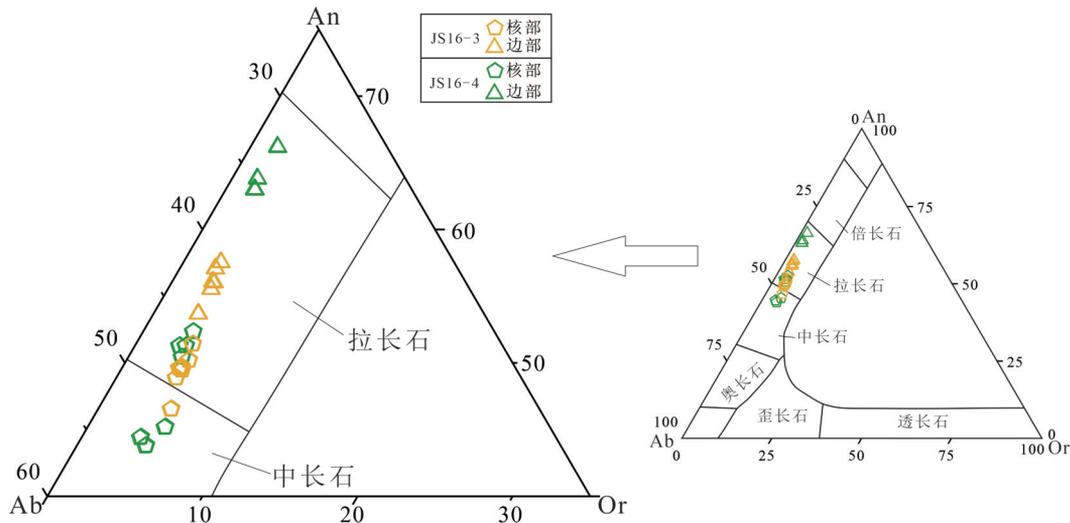


图3 上墅组粗安岩中斜长石成分图解

Fig. 3 Composition diagram of plagioclases in trachyandesite of the Shangshu Formation

程而发生变化,导致斜长石晶体在生长过程中形成复杂的环带结构,因此可以通过斜长石环带成分变化示踪岩浆演化过程(Ginibre and Wörner, 2007)。斜长石环带可分为正环带、反环带和韵律环带三类。正环带表现为基性长石核部向酸性长石边部渐变。通常认为正环带是岩浆演化过程中斜长石正常结晶形成(谢磊等, 2004)。韵律环带以核部向边部成分呈周期性韵律变化为特征,富Ca熔体的填充和岩浆含水量增加导致斜长石An发生变化是韵律环带形成的主要原因(L'Heureux and Fowler, 1994; Bouvet et al., 2013)。反环带与正环带特征相反,核部为酸性长石,边部为基性长石,这种类型的环带成因有两种解释:(1)岩浆混合作用;(2)岩浆房中温度与压力迅速改变(Smith and Lofgren, 1983; 牛之建等, 2014)。

浙江江山上墅组粗安岩中斜长石核部成分主要为中长石和拉长石,边部成分主要为拉长石,具有典型的反环带特征。岩浆房中温度与压力迅速改变会影响斜长石An的含量,但不会造成Sr、Mg、Fe等成分的变化(牛之建等, 2014),因此温度与压力迅速改变形成的斜长石反环带其An与Sr、Mg、Fe成分变化趋势不同。但在图4中,粗安岩中斜长石An含量与FeO<sup>T</sup>含量具有相似的变化趋势,且斜长石核部至边部成分变化多具有较好的线性关系,无明显突变(图5),不可能是由于岩浆房中温度与压

力迅速改变的结果,因此,我们认为本文研究的斜长石的反环带是岩浆混合作用形成的。斜长石核部相对边部富K、Na、Si,贫Ca、Al、Fe、Mg,表明斜长石早期从偏酸性的富硅岩浆结晶形成斑晶核部,再与偏基性的富钙岩浆发生混合作用结晶形成斑晶边部。斜长石核部与边部An成分局部降低的变化趋势(图4a)符合反环带特征,表明岩浆只经历了一次混合作用。两颗斜长石核部An、SiO<sub>2</sub>、FeO<sup>T</sup>、MgO等成分含量相似,但边部JS16-4比JS16-3有更高的An(图4a)和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、FeO<sup>T</sup>、MgO(图5),暗示JS16-4边部的结晶早于JS16-3,而JS16-3的Fe、Mg与Si线性关系较差可能是岩浆演化晚期发生钛铁矿的结晶分异导致的。

#### 4.2 岩石成因

在江南造山带东部南缘,沿江山-绍兴缝合线西北侧,新元古代上墅组火山岩形成于弧后伸展环境(Gao S et al., 2008)。浙江江山上墅组双峰式火山岩代表了新元古代晚期华夏与扬子两大陆块由碰撞拼贴造山阶段转化成陆内拉张造盆阶段(卢成忠和顾明光, 2007; 王剑和潘桂棠, 2009),形成于弧后裂谷环境(Li X H et al., 2008; 卢成忠等, 2009; 王自强等, 2012)。杭州市南部新元古代上墅组双峰式火山岩产于江山-绍兴断裂带之内,形成于陆内拉张环境(卢成忠和顾明光, 2007)。Zhang H et al. (2020)对上墅组火山岩中锆石Hf同

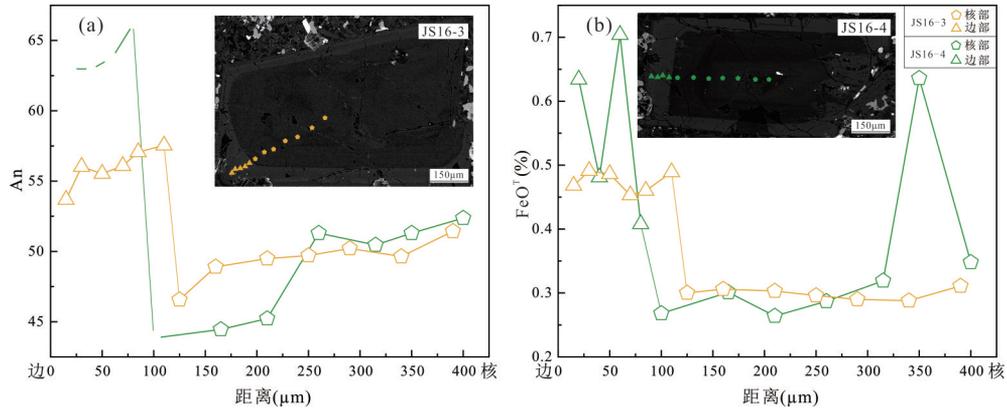


图4 上墅组粗安岩中斜长石成分变化剖面图

Fig. 4 The sectional diagram of plagioclase composition changes in trachyandesite of the Shangshu Formation

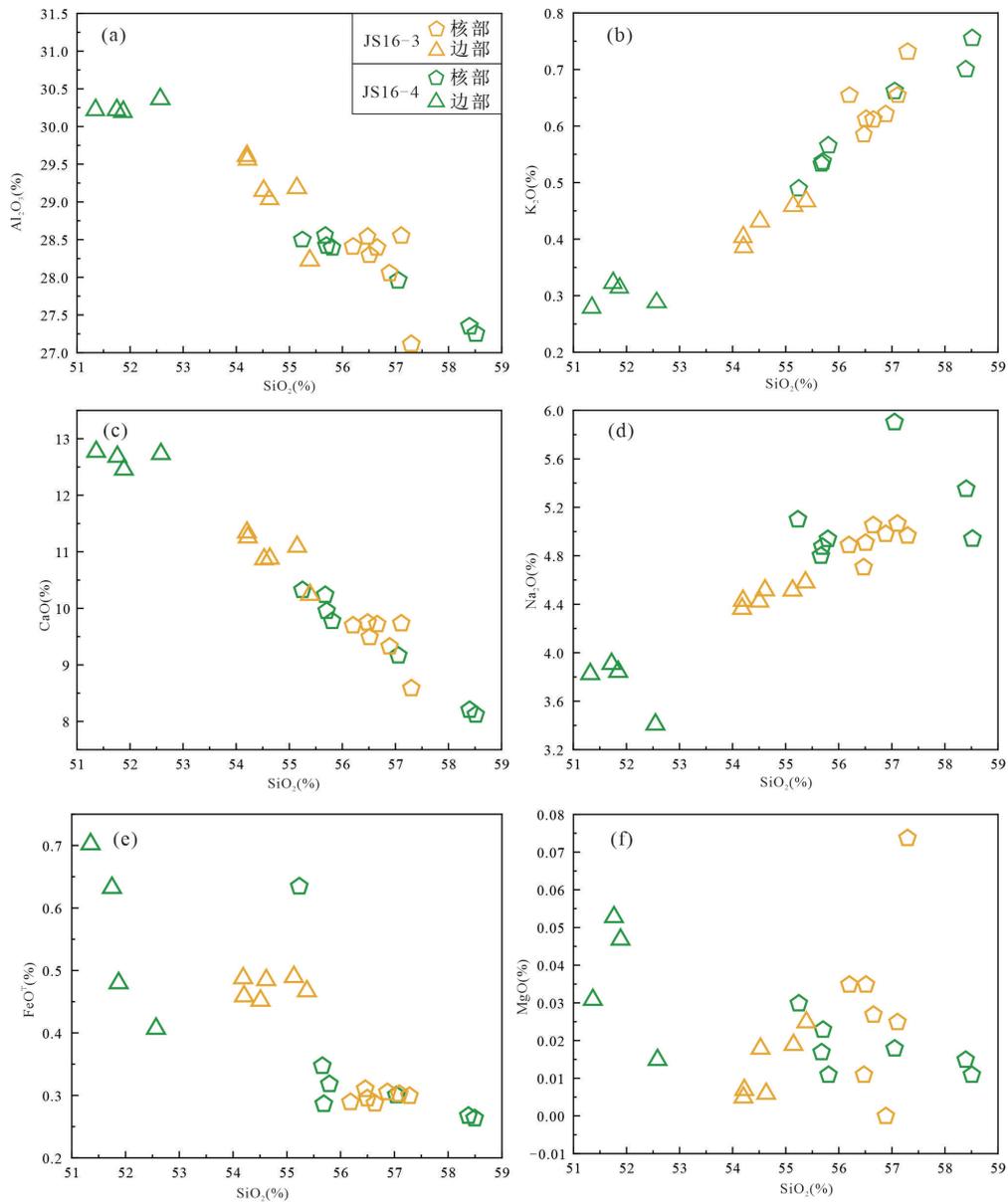


图5 上墅组粗安岩中斜长石矿物 SiO<sub>2</sub> 与主量元素含量对比图

Fig. 5 The diagram of SiO<sub>2</sub> against selected major element contents in trachyandesite of the Shangshu Formation

位素和全岩 Sr 同位素进行研究,认为岩浆源区为新生下地壳物质部分熔融形成,并与幔源岩浆发生混合。

上墅组粗安岩中斜长石斑晶研究显示,斜长石环带核部呈熔蚀的板状且较宽较暗,成分主要为中长石和拉长石,边部较窄较明亮,含较多细小钛铁矿等矿物包裹体,成分主要为拉长石,说明斜长石结晶过程中岩浆体系发生了突变,有外来岩浆的加入,斜长石在结晶过程中可能经历了岩浆混合作用。新元古代区域可能处于陆内拉张背景(卢成忠

和顾明光,2007;王剑和潘桂棠,2009),下地壳降压重熔形成了偏酸性的岩浆房,随着岩浆房内的温度下降,斜长石开始结晶,由内向外依次形成拉长石—中长石(图6a、b),随后由于幔源基性岩浆加入,与岩浆房中的偏酸性岩浆发生混合作用,早期结晶的核部中长石边缘被熔蚀(图6c),随后混合岩浆的温度不断下降,在熔蚀边部继续结晶形成拉长石,并包含大量的细小钛铁矿微晶(图6c),岩浆混合后持续的降温结晶,使斜长石斑晶具有总体呈反环带的特征(图4)。

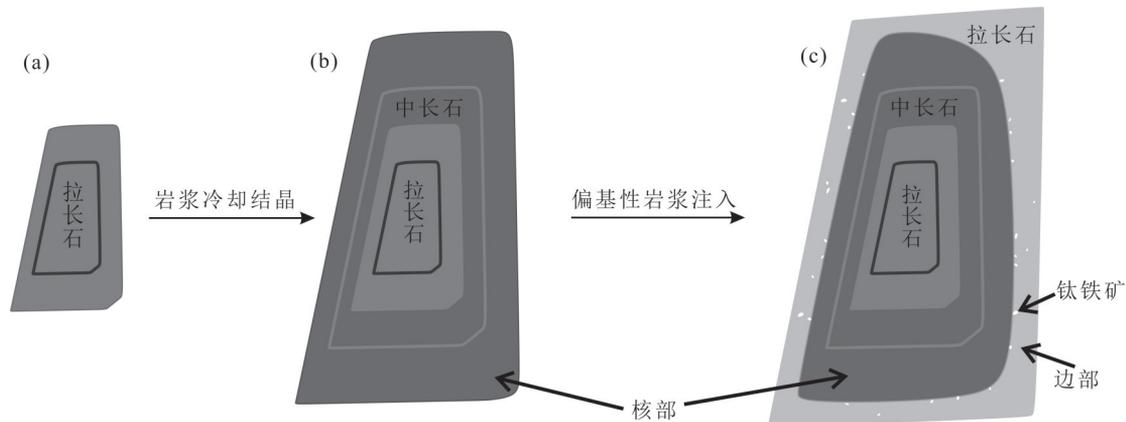


图6 上墅组粗安岩中斜长石环带结构形成示意图

Fig. 6 The form diagram of plagioclase zonal structure in trachyandesite of the Shangshu Formation

(a) 下地壳重熔形成偏酸性岩浆,结晶形成拉长石;(b) 岩浆持续冷却结晶形成中长石;(c) 偏基性岩浆混合,熔蚀中长石边缘后继续冷却结晶形成拉长石,含大量钛铁矿等包裹体。

## 5 结论

(1) 浙江江山上墅组粗安岩中的斜长石斑晶具有特征的核-边结构,核部呈熔蚀的板状,成分主要为拉长石—中长石( $An=44\sim 52$ ),边部成分以拉长石为主( $An=54\sim 66$ ),且核部和边部接触边界含有大量钛铁矿等矿物包裹体,整体为反环带结构。

(2) 浙江江山上墅组粗安岩中的斜长石核-边反环带结构和成分特征反映了粗安岩结晶过程中可能存在岩浆混合作用,可能与华夏、扬子两大陆块碰撞拼贴后的陆内拉张作用背景有关。

编辑和两位审稿人对本文的完善提出了建设性的意见和帮助,在此深表谢意。

## 参考文献:

- 董欢,邢长明,王焰.2017.攀西地区新街层状岩体粒间不混熔作用:来自斜长石环带结构的记录[J].大地构造与成矿学,41(2):369-380.
- 郭福生.2004.江山地质概论及区域地质调查实习指导书[M].北京:地质出版社,1-112.
- 国家质量监督检验检疫总局.2003.中华人民共和国国家标准《硅酸盐矿物的电子探针定量分析方法 GB/T15617—2002》[S].北京:中国标准出版社,1-6.
- 贾锦生,曹素巧,李汉明,洪汉烈,钟增球,王朝文,王浩,殷科,韩文.2016.浙西开化地区流纹岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J].大地构造与成矿学,40(4):772-782.
- 雷传扬.2021.班-怒成矿带西段阿翁错复式岩体的岩浆混合作用及动力学背景[D].成都理工大学博士学位论文.
- 李昌年,薛重生,廖群安,赵良政.1996.江西上饶地区发现我

- 国首例岩浆混合杂岩体群[J].地质科技情报,15(1):6.
- 卢成忠,顾明光.2007.杭州南部新元古代双峰式火山岩的厘定及其构造意义[J].中国地质,34(4):565-571.
- 卢成忠,杨树锋,顾明光,董传万.2009.浙江次坞地区晋宁晚期双峰式岩浆杂岩带的地球化学特征:Rodinia超大陆裂解的岩石学记录[J].岩石学报,25(1):67-76.
- 陆建军,章荣清,黄旭栋,张强,李晓宇,周维法,黄迪,黄玉,马东升,姜耀辉.2022.江南造山带钨锡稀有金属矿床成矿作用特征[J].华南地质,38(3):359-381.
- 牛漫兰,赵齐齐,吴齐,李秀财,闫臻,李继亮,孙毅,苑潇宇.2018.柴北缘果可山岩体的岩浆混合作用:来自岩相学、矿物学和地球化学证据[J].岩石学报,34(7):1991-2016.
- 牛之建,刘跃,狄永军.2014.大兴安岭五岔沟地区中生代粗安岩中斜长石环带特征及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,33(1):102-108.
- 谭陈诚,向轲,石少华,朱继华,陈剑锋,郑正福,林碧海.2020.南岭万洋山加里东期花岗岩地球化学特征、成因与构造意义[J].华南地质,36(2):138-146.
- 王剑,潘桂棠.2009.中国南方古大陆研究进展与问题评述[J].沉积学报,27(5):818-825.
- 王孝磊,周金城,陈昕,张凤凤,孙梓铭.2017.江南造山带的形成与演化[J].矿物岩石地球化学通报,36(5):714-735.
- 王玉往,王京彬,龙灵利,邹滔,唐萍芝,王莉娟.2012.岩浆混合作用的类型、标志、机制、模式及其与成矿的关系—以新疆北部为例[J].岩石学报,28(8):2317-2330.
- 王自强,高林志,丁孝忠,黄志忠.2012.“江南造山带”变质基底形成的构造环境及演化特征[J].地质论评,58(3):401-413.
- 谢磊,王德滋,王汝成,邱检生,陈小明.2004.浙江普陀花岗杂岩体中的石英闪长质包体:斜长石内部复杂环带研究与岩浆混合史记录[J].岩石学报,20(6):1937-1408.
- 徐步台,邱郁双.1994.浙西北上墅组同位素年代地层学研究[J].地球学报,(1-2):51-59.
- 杨世平,祝明明,孟涛,陈浩,刘华,耿翔.2021.江南造山带中段大湖山新元古代花岗岩U-Pb年代学、地球化学特征及其地质意义[J].资源环境与工程,35(5):559-571+579.
- 翟文建,赵焕,崔雪峰,何凯,翟文芳,杨俊峰,李承东.2020.北秦岭孤山坪地区辉长岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及Lu-Hf同位素组成[J].地质科技通报,39(5):127-138.
- 张旗,潘国强,李承东,金惟俊,贾秀勤.2007.花岗岩混合问题:与玄武岩对比的启示—关于花岗岩研究的思考之一[J].岩石学报,23(5):1141-1152.
- Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review[J]. Lithos, 78 (1-2):1-24.
- Bouvet De Maisonneuve C, Dungan M A, Bachmann O and Burgisser A. 2013. Petrological Insights into Shifts in Eruptive Styles at Volcán Llaima (Chile)[J]. Journal of Petrology, 54(2):393-420
- Dong C W, Yang Y F, Yan Q, Zhu G Q. 2007. Characteristics and formation processes of granite landforms in Zhejiang Province[J]. Geological Review, 53(S1):132-137.
- Gao P, Zhao Z F, Zheng Y F. 2016. Magma mixing in granite petrogenesis: Insights from biotite inclusions in quartz and feldspar of Mesozoic granites from South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 123:142-161.
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, Yuan H L, Liu Y S, Walker R J, Puchtel I S, Liu X M, Huang H, Wang X R, Yang J. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 270(1-2):41-53.
- Ginibre C, Wörner G, Kronz A. 2002. Minor and trace-element zoning in plagioclase: Implications for magma chamber processes at Paríacota volcano, northern Chile[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(3):300-315.
- Ginibre C, Wörner G. 2007. Variable parent magmas and recharge regimes of the Paríacota magma system (N. Chile) revealed by Fe, Mg and Sr zoning in plagioclase[J]. Lithos, 98(1-4):118-140.
- Grove T L, Baker M B, Kinzler R J. 1984. Coupled CaAl-Na-Si diffusion in plagioclase feldspar: Experiments and applications to cooling ratespeedometry[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(10):2113-2121.
- Hammer J E, Rutherford M J. 2002. An experimental study of the kinetics of decompression-induced crystallization in silicic melt[J]. Journal of Geophysical Research, 107 (B1):ECV 8-1-ECV 8-24.
- L'Heureux I, Fowler A D. 1994. A nonlinear dynamical model of oscillatory zoning in plagioclase[J]. American Mineralogist, 79(9-10):885-891.
- Li X H, Li W X, Li Z X, Liu Y. 2008. 850-790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, South China: a major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia[J]. Lithos, 102(1-2):

- 341-357.
- Nakamura M, Shimakita S. 1998. Dissolution origin and syn-entrapment compositional change of melt inclusion in plagioclase[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1-4):119-133.
- Shu L S. 2020. Neoproterozoic trench-arc system in the western segment of Jiangnan orogenic belt, South China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(S1):49.
- Smith R K, Lofgren G E. 1983. An analytical and experimental study of zoning in plagioclase[J]. *Lithos*, 16(2):153-168.
- Tepley F J, Davidson J P, Tilling R I, Arth J G. 2000. Magma mixing, recharge and eruption histories recorded in plagioclase phenocrysts from El Chichon Volcano, Mexico[J]. *Journal of Petrology*, 41(9):1397-1411.
- Ustunisik G, Kilinc A, Nielsen R L. 2014. New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase[J]. *Lithos*, 200(1):80-93.
- Yao J L, Cawood P A, Shu L S, Santosh M, Li J Y. 2016. An early Neoproterozoic accretionary prism ophiolitic mélange from the Western Jiangnan orogenic belt, South China[J]. *Journal of Geology*, 124(5):587-601.
- Zhang H, Liu Y X, Ding X Z, Gao L Z, Yang C, Zhang J B, Gong C Q, Liu H G. 2020. Geochronology, Geochemistry, Whole Rock Sr-Nd and Zircon Hf-O Isotopes of the Early Neoproterozoic Volcanic Rocks in Jiangshan, Eastern Part of the Jiangnan Orogen: Constraints on Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(4):1117-1137.
- Zhang Y Y, Zhong F J, Liu J G, Qi J M, Pan J Y, Xia F, Li H D. 2022. Genesis of the Mianhuakeng uranium deposit, South China: Constraints from in-situ sulfur isotopes and trace elements of pyrite[J]. *Applied Geochemistry*, 140:105-302.
- Zhao Z B, Xu Z Q, Ma X X, Liang F H, Guo P. 2018. Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Craton: New Insights from the polyphase deformation in the southwestern Jiangnan Orogen[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(5):1700-1727.
- Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, Zhang S B, Yuan H L, Wu F Y. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China[J]. *Precambrian Research*, 163(3-4):351-383.