

浙东早白垩世英坑火山 - 侵入杂岩的地球化学特征及其成因意义

庞妍妍, 温洁, 张纯桐

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年5月8日; 发布日期: 2025年5月19日

摘要

英坑火山 - 侵入杂岩由流纹岩和石英二长斑岩组成, 是浙江沿海晚中生代岩浆活动的典型代表。本文对英坑火山 - 侵入杂岩开展了系统的岩相学、全岩地球化学成分分析, 旨在探讨火山 - 侵入杂岩的成因联系和岩浆演化过程。地球化学分析结果显示, 英坑火山岩和侵入岩都具有 $A/CNK < 1.1$, 高铝($Al_2O_3 = 13.64 \sim 15.09 \text{ wt.}\%$), 高全碱($Na_2O + K_2O = 8.98 \sim 9.34 \text{ wt.}\%$)特征, 哈克图解显示流纹岩与石英二长斑岩具有良好的线性关系, 并且流纹岩的 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 FeO^T 、 TiO_2 、 P_2O_5 含量都比侵入岩的低, 流纹岩相较于石英二长斑岩(DI, 90.64~90.70)具有更高的分异指数(DI, 95.80~96.16), 这说明火山岩经历了更高分异作用。研究表明, 本区火山岩与侵入岩具有相似的地球化学特征, 为古太平洋板块俯冲导致的岩石圈减薄的背景下经历了壳幔组分混合和不同程度分离结晶作用的同期岩浆活动的产物。

关键词

火山 - 侵入杂岩, 地球化学特征, 分离结晶, 浙江

Geochemical Characteristics and Genetic Significance of the Early Cretaceous Yingkeng Volcanic-Intrusive Complex in Eastern Zhejiang

Yanyan Pang, Jie Wen, Chuntong Zhang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: May 8th, 2025; published: May 19th, 2025

文章引用: 庞妍妍, 温洁, 张纯桐. 浙东早白垩世英坑火山-侵入杂岩的地球化学特征及其成因意义[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 656-666. DOI: 10.12677/ag.2025.155064

Abstract

The Yingkeng volcanic-intrusive complex, composed of rhyolite and quartz monzonite porphyry, is a typical representative of the Mesozoic magmatic activity along the coastal region of Zhejiang. This study conducts a systematic petrographic and whole-rock geochemical analysis of the Yingkeng volcanic-intrusive complex, aiming to explore the genetic relationship and magmatic evolution process of the volcanic-intrusive rocks. The geochemical analysis results show that both the Yingkeng volcanic rocks and intrusive rocks have characteristics of $A/CNK < 1.1$, high alumina ($Al_2O_3 = 13.64\sim 15.09$ wt.%) and high total alkali content ($Na_2O + K_2O = 8.98\sim 9.34$ wt.%). The Harker diagrams reveal a strong linear correlation between rhyolite and quartz monzonite. Additionally, the rhyolite contains lower concentrations of Al_2O_3 , CaO, MgO, FeO^T , TiO_2 , and P_2O_5 compared to the intrusive rocks, and exhibits a higher differentiation index (DI, 95.80~96.16) than the quartz monzonite (DI, 90.64~90.70). This suggests that the volcanic rocks underwent a higher degree of crystallization differentiation. The results show that the volcanic rocks in this area have similar geochemical characteristics to the plutonic rocks, and are the products of the contemporaneous magmatic activity that underwent the mixing of crust-mantle components and different degrees of separation crystallization under the background of lithospheric thinning caused by the subduction of the Paleo-Pacific plate.

Keywords

Volcanic-Intrusive Complex, Geochemical Characteristics, Fractional Crystallization, Zhejiang

Copyright © 2025 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

火山-侵入杂岩作为花岗岩类与火山岩类相互关联的岩浆产物，两者在空间上相伴共生，在成因上密切联系，共同反映了岩浆系统从深部到浅部的演化过程。火山岩和侵入岩的成因联系是理解岩浆体系形成与演化的关键性问题[1]。有关酸性火山岩与侵入岩的成因联系有两种观点：1) 侵入岩是岩浆结晶分异的残留体，火山岩是晶粥中抽离的熔体喷发形成的，火山岩具有更高的结晶分异程度[2]；2) 侵入岩由岩浆结晶形成，不是岩浆分异残留的堆晶体，火山岩是独立于侵入岩的岩浆喷出形成的，火山岩与侵入岩具有不同的岩浆起源方式和形成过程[3]。火山岩和侵入岩之间形成上的差异逐渐被认为与岩浆的结晶分异和岩浆房的行为有关[4]。一般来讲，具有成因联系的火山岩和侵入岩不易同时保留在同一空间。破火山内出露的火山岩与浅成侵入岩则为硅质岩浆演化的研究提供了一个窗口，从而受到许多关注[5]。深入研究火山-侵入杂岩的形成机制，有助于揭示岩浆分异及演化的全过程。火山-侵入杂岩常发育于造山带、弧后盆地及大陆裂谷等重要构造环境中，其形成与洋壳俯冲消减、岩浆底侵及地壳部分熔融等动力学过程密切相关，能够为大陆地壳增生与改造机制提供关键证据。

晚中生代时期，中国东南沿海地区经历了强烈的构造-岩浆活动，古太平洋板块的俯冲导致了岩石圈的消减和地幔楔的部分熔融，从而形成了上侵的基性岩浆，这些岩浆在下地壳底部作为热源诱发了地壳基底的大规模部分熔融，岩石圈减薄及地幔物质上涌触发了广泛的岩浆活动，形成了大规模的火山-侵入杂岩带，其分布格局具有明显的区域构造控制特征，这些断裂不仅控制了火山-侵入杂岩的分布，

还影响了其成岩物质的来源和演化过程[6][7]。前人对东南沿海晚中生代酸性岩浆岩的形成时代、岩浆源区和地球动力学机制,做了大量的研究工作,认为中酸性火山-侵入岩是幔源岩浆与其诱发熔融产生的壳源长英质岩浆通过不同程度的混合作用所形成,这些岩石可以通过幔源岩浆或直接分离结晶形成,主体是壳幔岩浆混合作用的产物,或在上升侵位过程中经历不同程度的分异演化形成花岗岩[8][9]。

英坑岩体位于浙闽沿海构造-岩浆活动带上,是晚中生代典型的破火山口中央岩株侵入体,本文以英坑岩体为研究对象,开展系统的岩相学、全岩地球化学成分分析,旨在探讨英坑火山岩与侵入岩之间的成因联系和岩浆演化过程,为研究火山岩与侵入岩的成因联系提供新范例,还可为重建岩浆通道系统和深化岩浆演化过程的研究提供关键细节,深化对闽浙沿海地区晚中生代岩浆作用的认识,进一步丰富中国东南沿海构造-岩浆演化背景的理解。

2. 地质概况及样品

中国东南沿海位于亚洲东部大陆边缘南段,濒临太平洋西岸,由扬子地块和华夏地块组成。在中生代,中国东南沿海地区经历了大规模的火山活动,形成了广泛的火山岩带,形成了巨型火山-侵入杂岩带,该带大致以赣江断裂为界,以西主要出露花岗岩,以东火山岩遍布于苏、浙、闽、赣、粤、琼诸省,构成长约 1200 km、宽约 500 km 的东南大陆中生代火山岩带[6][10]。白垩纪(燕山晚期)是中国东南部岩浆活动的高峰期,通常被认为形成于古太平洋板块对华南板块俯冲消减作用的构造背景[11][12]。

英坑破火山位于浙江台州市仙居县境内,政和-大埔断裂以东,岩体主要受北东向区域构造控制。英坑破火山杂岩包括一个火山岩性段和一个中央侵入体岩体,侵入体北侧和中部均被断裂破坏。破火山内出露的白垩纪地层单一,为西山头组。西山头组地层属于中生代早白垩世早期的地层,地层分布广泛,主要岩性包括流纹质含晶屑玻屑熔结凝灰岩、粉砂岩,局部为流纹岩、安山岩等[13][14]。

本次研究采集了英坑地区火山岩样品 2 件,侵入岩样品 2 件,岩石样品的基本特征描述如下: 1) 流纹岩,呈灰白、肉红色,流纹构造,斑状结构。斑晶约 10%~30%,主要是石英(5%~10%)和钾长石(15%~20%),有时可见少量斜长石(1%~2%)和不透明矿物(1%左右),熔蚀现象明显,斑晶钾长石具有熔蚀边,基质为隐晶质,约 60%~70%,由隐晶质和长石石英微晶各自组成条带,遇斑晶则绕过。石英常呈自形-半自形粒状,边缘常发育被熔蚀的港湾状结构;钾长石呈半自形板状,发生高岭土化;斜长石为自形板状,发育细密聚片双晶,发生轻微绢云母化和高岭土化。2) 石英二长斑岩,岩石呈浅肉红色,岩石具有斑状结构,块状构造。主要物质组成包括斑晶斜长石(35%),碱性长石(30%)、石英(20%)角闪石(5%)辉石(5%)。长石斑晶较自形,部分发生绢云母化。斜长石中可见聚片双晶,部分发生强烈的绢云母化和绿帘石化,表面模糊不清。石英斑晶呈次棱角状。基质具微晶结构,主要矿物组成有:斜长石微晶、碱性长石微晶、石英微晶。不透明矿物约 5%。

3. 分析方法

1) 全岩主量元素测试分析

全岩主量元素成分分析在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室进行,采用碱玻璃片 XRF 法,仪器选择日本理学 ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪测定,精度为 2%~5%。主要包括烧失量测量和玻璃片制作两个部分。烧失量测量时,首先清洗并研磨样品至 200 目,干燥后放入马弗炉以 1000℃加热 3 小时。冷却后称量坩埚重量(M1)和样品重量(M2),再加热 3 小时,记录总重量(M3)。根据公式计算烧失量:烧失量 = (M1 + M2 - M3)/M2。制作玻璃片时,预热熔样机至 1150℃,清洗坩埚并蒸干后,混合样品粉末与四硼酸锂粉末,加入脱模剂,放入熔样机中加热 10 分钟。熔样后,将坩埚取出冷却,得到玻璃片。完成后,玻璃片送至实验室进行主量元素测试。测试方法详见[15]。

2) 全岩微量元素测试分析

全岩微量元素测试在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成。本次样品的微量元素分析采用高温高压消解酸溶法, 测试仪器为 Agilent 7500 cx 型电感耦合等离子质谱, 分析精度优于 5%。实验包括清洗溶样罐、溶样和稀释定容三个步骤。清洗溶样罐时, 先用废酸浸泡 12 小时, 再用水清洗并在 180℃ 加热 30 分钟去除杂质; 随后用 1:1 HNO₃、1:1 HCl 和 1:1 HNO₃ 溶液加热 8 小时, 最后用 Milli-Q 水煮沸清洗。溶样过程中, 称取 40 mg 样品, 加入 2 ml 纯化浓 HNO₃ 和浓 HF 混合酸, 超声震荡 30 分钟后加热 12 小时。随后, 样品置于高压釜中加热 48 小时, 再用 HClO₄ 蒸干, 并最终加纯化 HNO₃ 进一步处理。稀释定容时, 将冷却后的样品与 2% 纯化 HNO₃ 混合, 稀释至样品重量的 1000 倍, 摇匀后用于微量元素测试分析。具体测试方法见[16]。

4. 分析结果

英坑火山 - 侵入杂岩样品的主、微量元素分析结果见表 1。所有流纹岩样品都具有较高的 SiO₂ 含量, SiO₂ 含量为 72.67~73.19 wt.%, 全碱(Na₂O + K₂O)含量为 8.98~9.33 wt.%, 相对富钾(K₂O = 4.49~5.15 wt.%), 在 TAS 图解上落在流纹岩区域(图 1(a)), A/CNK 值[molar Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O)]集中在 0.99~1.04, 介于准铝质到过铝质(图 1(c))。

与流纹岩样品相比, 石英二长斑岩的 SiO₂ 含量较低, 为 66.33~66.50 wt.%, 全碱(Na₂O + K₂O)含量为 9.11~9.34 wt.%, K₂O 含量为 4.33~4.89 wt.%. 在 TAS 图上落在碱性区域(图 1(b))。A/CNK 值[molar Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O)]集中在 0.91~0.92 之间, 属于准铝质系列(图 1(c))。在 SiO₂-(Na₂O + K₂O-CaO) 的判别图上, 流纹岩样品落在碱钙性区域, 而石英二长斑岩都落在碱性区域(图 1(d))。

流纹岩的 Al₂O₃ 含量为 13.64~14.15 wt.%, CaO 含量为 0.71~0.74 wt.%, MgO 含量为 0.28~0.34 wt.%, FeO^T 含量为 1.13~1.44 wt.%, Ti、P 含量较低(TiO₂ = 0.18~0.22 wt.%, P₂O₅ = 0.04~0.06 wt.%)。石英二长斑岩的 Al₂O₃ 含量为 14.96~15.09 wt.%, CaO 含量为 2.07~2.09 wt.%, MgO 含量为 0.98~1.00 wt.%, FeO^T 含量为 2.90~3.06 wt.%, Ti、P 含量较高(TiO₂ = 0.55~0.60 wt.%, P₂O₅ = 0.20~0.23 wt.%)。

从微量和稀土元素来看, 流纹岩样品具有低 Sr (29~52 ppm) 的特征, 在球粒陨石标准化图解(图 2(a)) 中, 流纹岩显示轻重稀土分馏, 轻稀土相对富集($\Sigma\text{LREE} = 158 \times 10^{-6} \sim 251 \times 10^{-6}$), 重稀土亏损($\Sigma\text{HREE} = 17.71 \times 10^{-6} \sim 27.45 \times 10^{-6}$), (La/Yb)_N = 11.99~12.09, (Gd/Yb)_N = 2.18~2.20, 具有右倾的稀土分配型式, 显示出较低的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.32 \sim 0.57$)。微量元素蛛网图显示, 流纹岩富集 Rb、Th、Pb, 亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti (图 2(b))。石英二长斑岩稀土总量($\Sigma\text{REE} = 276 \times 10^{-6} \sim 289 \times 10^{-6}$), 同样富集轻稀土元素((La/Yb)_N = 13.70~13.92), 亏损重稀土元素((Gd/Yb)_N = 2.39~2.45), 轻微 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.91$), 呈现出与流纹岩相似的稀土分配特征, 为右倾型。在微量元素组成上, Nb、Ta、Sr、Ti 同样表现出亏损的特征(图 2(b))。

5. 讨论

5.1. 英坑火山 - 侵入杂岩的岩浆起源

早白垩世期间, 随着俯冲板块倾角增大, 导致活动岩浆带向俯冲边界迁移, 这一过程中, 由于板块回撤, 持续的拉张作用导致地壳和岩石圈减薄, 导致富集的岩石圈地幔发生部分熔融, 产生富镁、富钾的基性岩浆[17]。高温的基性岩浆侵入于中 - 下地壳, 在伸展断裂引起的减压作用和基性岩浆底侵作用带来的足够热量的影响下, 引发中 - 下地壳 - 古元古代变质基底的部分熔融并产生大规模的中性熔体。这些中性熔体迁移至中 - 上地壳后, 聚集形成了一个浅成长英质岩浆储库[18]。

岩浆的形成经过地幔或地壳的部分熔融和分离结晶作用, 并伴随不同程度的同化混染, 是一个极其复杂的演化过程。前人研究认为, 在花岗岩成岩过程中, 幔源组分参与的重要性的普遍性已日益为地质

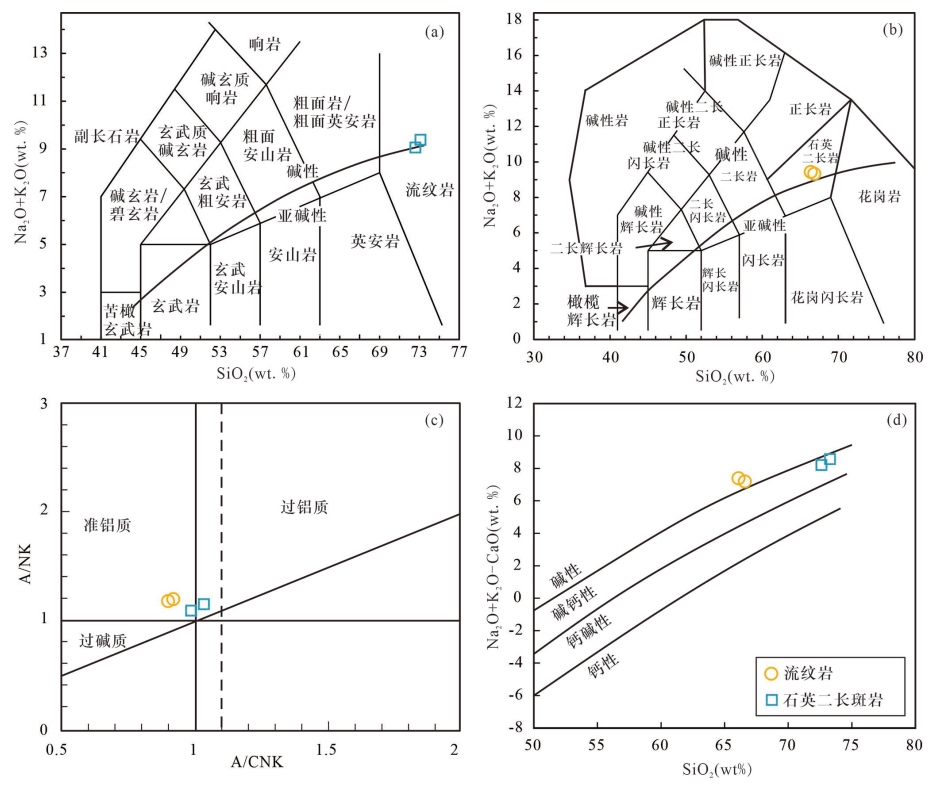


Figure 1. Geochemical classification diagrams of rock types and series for samples of the Yingkeng volcanic-intrusive complex
图 1. 英坑火山 - 侵入杂岩的岩石类型和岩石系列

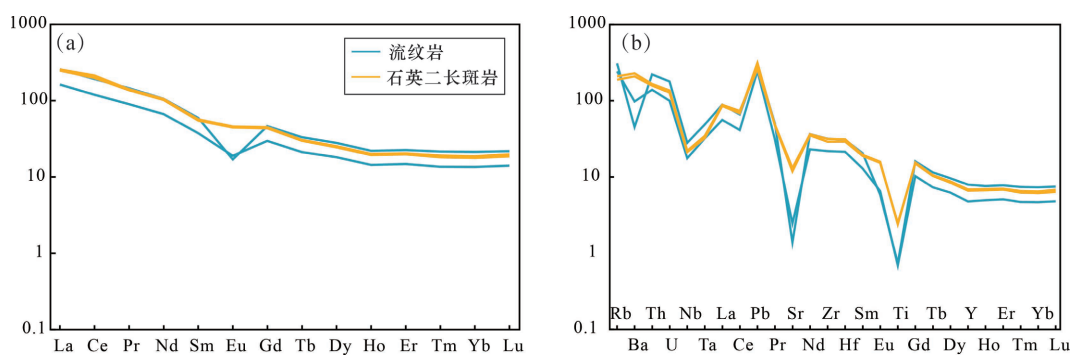


Figure 2. Yingkeng volcanic-intrusive complex (a) Normalized rare earth element distribution map of chondrite meteorite; (b) Normalized trace element spider web diagram of the original mantle
图 2. 英坑火山 - 侵入杂岩(a) 球粒陨石标准化稀土元素配分图; (b) 原始地幔标准化微量元素蛛网图

Table 1. Analysis results of major elements (wt.%) and trace elements (ppm) of Yingkeng volcanic-intrusive complex
表 1. 英坑火山 - 侵入杂岩的主量元素(wt.%)和微量元素(ppm)分析结果

样品号	22ZJ01	22ZJ02	22ZJ03	22ZJ04
样品岩性	流纹岩	流纹岩	石英二长斑岩	石英二长斑岩
SiO ₂	72.67	73.19	66.50	66.33
Al ₂ O ₃	14.15	13.64	15.09	14.96
Fe ₂ O ₃ ^T	1.60	1.26	3.40	3.23

续表

FeO	1.22	0.96	2.60	2.47
FeO ^T	1.44	1.13	3.06	2.90
MnO	0.10	0.08	0.14	0.15
MgO	0.34	0.28	1.00	0.98
CaO	0.74	0.71	2.07	2.09
Na ₂ O	4.49	4.18	4.78	4.45
K ₂ O	4.49	5.15	4.33	4.89
P ₂ O ₅	0.06	0.04	0.23	0.20
TiO ₂	0.22	0.18	0.60	0.55
LOI	0.79	0.99	1.58	1.58
Total	99.64	99.70	99.72	99.42
NaO + K ₂ O	8.98	9.33	9.11	9.34
Na ₂ O + K ₂ O-CaO	8.24	8.61	7.04	7.25
A/CNK	1.04	0.99	0.92	0.91
A/NK	1.16	1.10	1.20	1.19
DI	95.80	96.16	90.70	90.64
Mg [#]	32.80	33.72	40.70	41.51
Li	8.41	4.38	14.07	14.86
Be	1.45	2.03	1.84	1.74
B	0.12	0.16	0.03	0.02
Sc	3.26	3.12	6.52	6.40
Ti	899	954	3215	3109
V	4.41	3.23	30.58	29.22
Cr	15.39	79.53	10.42	11.71
Mn	567	698	1100	1243
Co	20.79	24.92	15.25	19.04
Ni	11.21	44.36	3.61	4.50
Cu	1.18	2.87	2.82	2.88
Zn	45.37	50.27	60.92	72.60
Ga	27.73	21.64	62.73	69.66
Ge	0.64	0.64	1.02	1.04
Rb	154	196	120	133
Sr	51.65	29.19	250	275
Y	21.70	36.08	30.02	31.25
Zr	244	354	323	353
Nb	12.53	19.92	15.07	15.67

续表

Mo	0.34	3.17	0.37	0.63
Cd	0.45	0.55	0.57	0.67
Cs	1.73	2.71	2.22	2.31
Ba	680	315	1458	1593
La	38.34	60.74	58.46	60.41
Ce	72.87	117	121	130
Pr	8.49	13.77	12.95	13.31
Nd	31.01	49.24	47.57	48.93
Sm	5.72	9.06	8.37	8.65
Eu	1.10	0.98	2.57	2.65
Gd	6.09	9.49	8.92	9.14
Tb	0.79	1.24	1.11	1.14
Dy	4.59	7.07	6.20	6.42
Ho	0.81	1.24	1.09	1.13
Er	2.44	3.71	3.27	3.37
Tm	0.35	0.55	0.46	0.48
Yb	2.29	3.60	3.01	3.16
Lu	0.36	0.55	0.47	0.50
Hf	6.59	9.45	8.98	9.63
Ta	1.31	1.99	1.33	1.41
W	178	238	152	208
Tl	4.64	8.46	7.38	6.20
Pb	17.33	20.76	22.15	18.58
Bi	78.41	157	50.23	34.12
Th	11.78	18.77	13.39	14.05
U	2.09	3.74	2.67	2.84
ΣLREE	158	251	251	264
ΣHREE	17.71	27.45	24.53	25.34
ΣREE	175	278	276	289
(La/Yb) _N	11.99	12.09	13.92	13.70
(Gd/Yb) _N	2.20	2.18	2.45	2.39
Eu/Eu*	0.57	0.32	0.91	0.91

注: $A/CNK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ (分子比), $A/CNK = Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ (分子比); DI 为分异指数; $Mg^\# = 100 \times MgO/(MgO + FeO)$; $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm \times Gd)_N^{1/2}$, N = chondrite normalized concentrations。

学家们所重视, 因为其不仅可以为地壳物质的重熔形成花岗质岩浆提供热源, 同时还可以作为物质组分直接参与到花岗岩的形成中。火山岩和侵入岩提供了研究地幔、地壳和岩浆的天然样品, 是认识岩浆分

异演化以及地球动力作用的有效途径。

英坑流纹岩与石英二长斑岩在空间上密切共生, 并且地球化学特征相似, 表明这些岩浆岩是同期岩浆作用的产物。前人的研究指出, 单一源区生成的岩浆未经混染, 其微量元素 La/Ce 和 Rb/Ti 的相关性落点应较为集中。(图 3)显示英坑破火山杂岩的落点分布较为分散, 反映可能来自不同的陆壳源区[13]。英坑火山-侵入杂岩具有高硅、低镁、过铝质的特征, 与陆壳物质部分熔融形成的熔体成分相似[19]。 $\text{Mg}^\#$ 值是区分幔源组分是否参与壳源岩浆的良好指示剂[20], 实验岩石学研究表明, 玄武质下地壳发生部分熔融产生的熔体, 无论熔融程度高低, 其 $\text{Mg}^\#$ 值均较低(<40), 只有存在地幔物质参与成岩时, 才能导致熔体的 $\text{Mg}^\#$ 值大于 40 [21]。英坑石英二长斑岩样品 $\text{Mg}^\#$ 值为 40.70~41.51, 样品的 $\text{Mg}^\#$ 均高于纯地壳物质部分熔融形成的岩石的 $\text{Mg}^\#$, 表明其成岩过程中必须有幔源组分参与。从产出背景来看, 英坑火山-侵入杂岩体位于闽浙沿海地区晚中生代构造-岩浆活动带, 目前一致认为闽浙沿海地区晚中生代的岩浆作用应形成于古太平洋板块俯冲消减后撤诱发的弧后伸展扩张环境, 这一环境对于幔源玄武质岩浆的底侵、壳幔物质的混合、火山的喷发与火山岩的形成都提供了有利的条件[11][12]。因此, 本文认为英坑火山-侵入杂岩的原始岩浆源于底侵的幔源岩浆与其诱发熔融的深部壳源岩浆的混合岩浆。

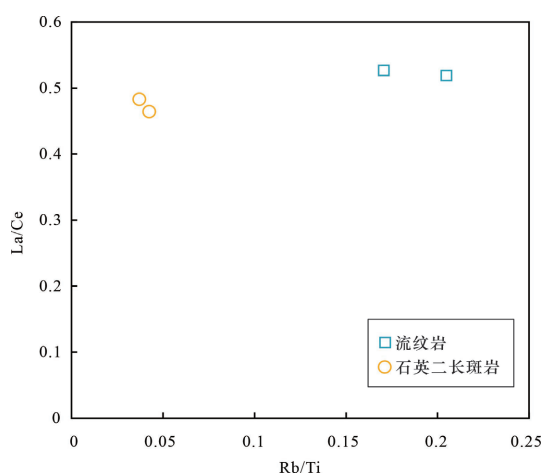


Figure 3. Diagram of the discriminant magma evolution process
图 3. 岩浆演化过程判别图解

5.2. 火山-侵入杂岩成因联系

目前普遍观察到的火山-侵入杂岩中火山岩与侵入岩之间的成因联系, 以及复式岩体中分异花岗岩与堆晶花岗岩的成因联系均表明了晶体-熔体分离作用在硅质岩浆演化中的关键作用[2][22]-[24]。近年来, 晶粥模型被普遍接受并被认为是高演化岩浆的主要成因之一[23][25]。这些高硅花岗岩-流纹岩(SiO_2 含量大于 70%~75% 的岩石)通常为细粒或隐晶质结构, 斑晶含量极低, 高度富集不相容元素(K、Rb 等)并具有极低的 MgO 、Ba、Sr 含量及强烈的 Eu 负异常[23][26]。在高硅流纹岩的形成中, 分离结晶作用主要通过两种方式实现: 一种是通过晶体的沉降或压实驱动的晶体-熔体分离过程, 另一种是通过岩浆房中的晶体-熔体分离。这些过程通常发生在地壳浅部的岩浆储库中, 这些储库通常以高结晶度的“晶粥”形式存在, 其中晶体和熔体可以通过沉降压实的方式有效地分离[2][27][28]。

酸性岩浆体系中 Sr 和 Eu 强相容于斜长石, Rb 不相容于斜长石, Sr 和 Eu 的负异常和 Rb 的正异常与斜长石的分离结晶有关[29], 而 Ba 强相容于钾长石, Ba 的负异常与钾长石结晶有关[30]。流纹岩强烈的 Eu、Sr、Ba 负异常和 Rb 的正异常示岩浆经历了强烈斜长石和钾长石等矿物的分离结晶作用。强烈的 Ti 和 P 负异常可能与富 Ti 矿物(榍石和钛铁矿)和富磷矿物(磷灰石)的分离结晶有关。英坑火山-侵入

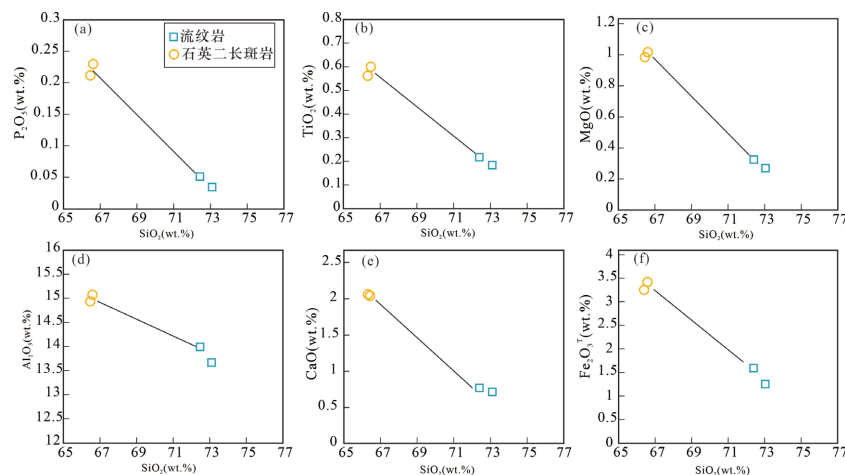


Figure 4. Harker diagrams of the Yingkeng volcanic-intrusive complex
图 4. 英坑火山 - 侵入杂岩哈克图解

杂岩在 Harker 图解上显示存在 SiO_2 成分间断($\text{SiO}_2 = 66\% \sim 72\%$) (图 4), 流纹岩具有较高的 SiO_2 含量, 而 P_2O_5 、 TiO_2 、 MgO 等含量较低以及强烈亏损 Eu 、 Ba 、 Sr 、 P 、 Ti 微量元素, 表明流纹岩相比石英二长斑岩具有较高的演化程度。相比于流纹岩, 石英二长斑岩具较低的 SiO_2 含量, 具有较高的 P_2O_5 、 TiO_2 、 MgO 等含量, 较弱的 Ti 、 Sr 亏损, 反映分异程度较低。流纹岩($\text{DI} = 95.80 \sim 96.16$)相较于石英二长斑岩($\text{DI} = 90.64 \sim 90.70$)具有更高的分异指数。因此, 英坑中的侵入岩可能代表了岩浆储库底部的堆晶花岗岩, 由熔体抽离后的残余熔体和早期结晶的矿物斑晶冷却结晶形成[31] (图 5)。这些侵入岩具有高 Ba 含量, 表明岩浆早期经历了碱性长石的堆晶[30], 侵入岩具有高 Sr 含量和 Eu/Eu^* , 表明岩浆早期经历了斜长石堆晶作用[29]。侵入岩较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值和 CaO 、 MgO 、 FeO^{T} 、 TiO_2 含量表明岩浆也经历了富含轻稀土的副矿物(磷灰石、褐帘石、独居石)和暗色矿物的堆晶[22] [32] [33]。流纹岩与石英二长斑岩具有相似的物质组成, 一致的微量元素亏损或富集特征, 这些特征表明英坑火山岩和侵入岩可能来自同一岩浆储库, 可能经历了相同的演化过程, 而二者之间的成分差异表明初始岩浆在上升侵位过程中存在一定程度的晶体 - 熔体分离结晶。因此, 本文认为流纹岩与石英二长斑岩形成于同源岩浆结晶分异的不同演化阶段。

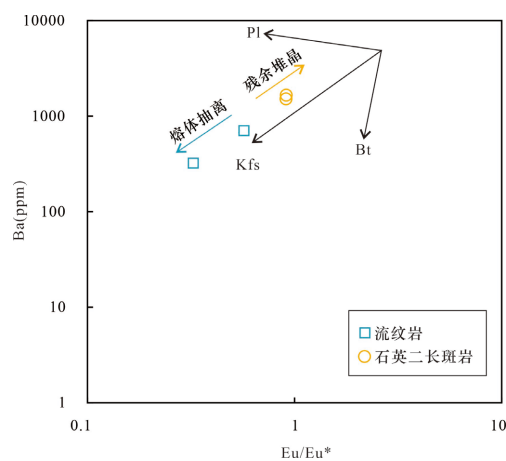


Figure 5. Trace element covariant diagram of Yingkeng volcano-intrusive complex (PI: plagioclase; Kfs: potash feldspar; Bt: biotite)
图 5. 英坑火山 - 侵入杂岩微量元素协变图(PI: 斜长石; Kfs: 钾长石; Bt: 黑云母)

6. 结论

1) 英坑火山 - 侵入杂岩具有高硅、低镁、过铝质的特征, 石英二长斑岩样品 $Mg^\#$ 值高于纯地壳物质部分熔融形成的岩石的 $Mg^\#$ 值, 指示成岩过程中有幔源组分参与, 表明英坑火山 - 侵入杂岩是同一母岩浆不同阶段演化的产物, 岩浆来源为壳幔混合成因。

2) 全岩地球化学特征分析表明, 英坑火山 - 侵入杂岩在物质来源上具有密切的成因联系, 这表明它们是产于一个破火山机构中的一套典型的火山 - 侵入杂岩, 岩浆的演化主要受控于分离结晶作用, 分离结晶的矿物可能有碱性长石、斜长石、黑云母和磁铁矿等暗色矿物及富含轻稀土的副矿物。

参考文献

- [1] Xu, X., Zhao, K., He, Z., Liu, L. and Hong, W. (2021) Cretaceous Volcanic-Plutonic Magmatism in SE China and a Genetic Model. *Lithos*, **402**, Article 105728. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105728>
- [2] Bachmann, O. and Huber, C. (2016) Silicic Magma Reservoirs in the Earth's Crust. *American Mineralogist*, **101**, 2377-2404. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5675>
- [3] Glazner, A.F., Coleman, D.S. and Mills, R.D. (2015) The Volcanic-Plutonic Connection. In: Breikreuz, C. and Rocchi, S., Eds., *Advances in Volcanology*, Springer International Publishing, 61-82. https://doi.org/10.1007/11157_2015_11
- [4] 王硕, 王孝磊, 杜德宏. 火山岩-侵入岩的联系[J]. 高校地质学报, 2020, 26(5): 497.
- [5] Yan, L., He, Z. and Xu, X. (2020) Magma Recharge Processes of the Yandangshan Volcanic-Plutonic Caldera Complex in the Coastal SE China: Constraint from Inter-Grain Variation of Sr Isotope of Plagioclase. *Journal of Asian Earth Sciences*, **201**, Article 104511. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104511>
- [6] 王德滋, 周金城, 邱检生, 范洪海. 中国东南部晚中生代花岗岩质火山-侵入杂岩特征与成因[J]. 高校地质学报, 2000, 6(4): 487.
- [7] 夏炎, 刘磊, 徐夕生. 中国东南部晚中生代 A 型花岗岩类与古太平洋板块俯冲-后撤[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6): 1109-1119.
- [8] Liu, L., Xu, X. and Xia, Y. (2014) Cretaceous Pacific Plate Movement beneath SE China: Evidence from Episodic Volcanism and Related Intrusions. *Tectonophysics*, **614**, 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.007>
- [9] Guo, F., Fan, W., Li, C., Zhao, L., Li, H. and Yang, J. (2012) Multi-Stage Crust-Mantle Interaction in SE China: Temporal, Thermal and Compositional Constraints from the Mesozoic Felsic Volcanic Rocks in Eastern Guangdong-Fujian Provinces. *Lithos*, **150**, 62-84. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.12.009>
- [10] 谢家宝, 陶奎元. 中国东南大陆中生代火山岩地质及火山——侵入杂岩[J]. 火山地质与矿产, 1997(2): 166.
- [11] Zhou, X., Sun, T., Shen, W., Shu, L. and Niu, Y. (2006) Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, **29**, 26-33. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i1/004>
- [12] Chen, C., Lee, C. and Shinjo, R. (2008) Was There Jurassic Paleo-Pacific Subduction in South China?: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating, Elemental and Sr-Nd-Pb Isotopic Geochemistry of the Mesozoic Basalts. *Lithos*, **106**, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.06.009>
- [13] 段政, 邢光福, 余明刚, 赵希林, 靳国栋, 陈志洪. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 454-469.
- [14] 刘磊, 徐夕生, 夏炎, 梁琼丹, 裴小利. 浙东南地区晚中生代“祝村组”的解体: 相关火山岩形成时代及岩石成因[J]. 岩石学报, 2017, 33(1): 115-126.
- [15] 李献华, 刘颖. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 289-294.
- [16] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552-558.
- [17] Zhou, X.M. and Li, W.X. (2000) Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, **326**, 269-287. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00120-7)
- [18] Jiang, Y., Ling, H., Jiang, S., Fan, H., Shen, W. and Ni, P. (2005) Petrogenesis of a Late Jurassic Peraluminous Volcanic Complex and Its High-Mg, Potassic, Quenched Enclaves at Xiangshan, Southeast China. *Journal of Petrology*, **46**, 1121-1154. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi012>
- [19] Sisson, T.W., Ratajeski, K., Hanks, W.B. and Glazner, A.F. (2005) Voluminous Granitic Magmas from Common Basaltic

- Sources. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **148**, 635-661. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0632-9>
- [20] Smithies, R.H. (2000) The Archaean Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) Series Is Not an Analogue of Cenozoic Adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, **182**, 115-125. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00236-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00236-3)
- [21] Rapp, R.P. and Watson, E.B. (1995) Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, **36**, 891-931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- [22] Yan, L., He, Z., Jahn, B. and Zhao, Z. (2016) Formation of the Yandangshan Volcanic-Plutonic Complex (SE China) by Melt Extraction and Crystal Accumulation. *Lithos*, **266**, 287-308. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.029>
- [23] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 745-765.
- [24] 贺振宇, 颜丽丽, 褚平利, 向华, 蒋子堃. 中国东南沿海晚白垩世长屿火山的活动过程与古环境意义[J]. 岩石学报, 2022, 38(5): 1419-1442.
- [25] 马昌前, 李艳青. 花岗岩体的累积生长与高结晶度岩浆的分异[J]. 岩石学报, 2017, 33(5): 1479-1488.
- [26] Halliday, A.N., Davidson, J.P., Hildreth, W. and Holden, P. (1991) Modelling the Petrogenesis of High Rb/Sr Silicic Magmas. *Chemical Geology*, **92**, 107-114. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(91\)90051-r](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90051-r)
- [27] 郑世帅, 徐夕生. 浙东晚白垩世小雄破火山中火山-侵入杂岩的岩石成因[J]. 岩石学报, 2021, 37(12): 3712-3734.
- [28] Lee, C.A. and Morton, D.M. (2015) High Silica Granites: Terminal Porosity and Crystal Settling in Shallow Magma Chambers. *Earth and Planetary Science Letters*, **409**, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.10.040>
- [29] Klimm, K., Holtz, F. and King, P.L. (2008) Fractionation vs. Magma Mixing in the Wangrah Suite A-Type Granites, Lachlan Fold Belt, Australia: Experimental Constraints. *Lithos*, **102**, 415-434. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.018>
- [30] Macdonald, R., Rogers, N.W., Bagiński, B. and Dzierzanowski, P. (2010) Distribution of Gallium between Phenocrysts and Melt in Peralkaline Salic Volcanic Rocks, Kenya Rift Valley. *Mineralogical Magazine*, **74**, 351-363. <https://doi.org/10.1180/minmag.2010.074.2.351>
- [31] Lipman, P.W. and Bachmann, O. (2015) Ignimbrites to Batholiths: Integrating Perspectives from Geological, Geophysical, and Geochronological Data. *Geosphere*, **11**, 705-743. <https://doi.org/10.1130/ges01091.1>
- [32] 陈璟元, 杨进辉, 张吉衡, 周夏冰, 杨志国. 挥发份对高硅岩浆演化趋势的制约: 以东南沿海白垩纪晚期花岗岩类岩石为例[J]. 岩石学报, 2022, 38(5): 1460-1480.
- [33] 王力圆, 彭向东, 黄亮亮, 林木森, 张文慧. 福州闽侯地区长安山闪长岩和流纹岩的成因及地质意义[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1833-1849.