

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.04.005

引用格式:贺振宇, 颜丽丽, 褚平利, 等. 浙东长屿破火山的典型识别特征[J]. 华东地质, 2022, 43(4): 448-459. (HE Z Y, YAN L L, CHU P L, et al. Typical recognition features of the Changyu caldera in the eastern Zhejiang Province[J]. East China Geology, 2022, 43(4): 448-459.)

浙东长屿破火山的典型识别特征

贺振宇¹, 颜丽丽², 褚平利³, 张 进⁴

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;
3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 破火山在中国东南沿海白垩纪巨型硅质火山-侵入杂岩带中大量分布, 其成因及相关的火山活动过程是理解中国东南部构造-岩浆与成矿作用的重要科学问题。破火山是近圆形的火山洼地, 其形成与大量岩浆喷出的爆炸式火山碎屑流喷发伴随的岩浆房顶板塌陷有关。对于经历剥蚀的古老破火山, 其内部岩石相对围岩来说更年轻, 与围岩并列接触并有截然的界线, 是识别破火山的重要依据。破火山一般经历多阶段的火山活动过程, 包括塌陷前喷发、破火山形成喷发、破火山形成后喷发和破火山复活等, 识别这些不同的火山喷发和岩浆活动阶段是理解破火山形成与演化的关键问题。浙东晚白垩世长屿火山具有典型的破火山识别特征: ① 火山岩呈直径约 12 km 的圆形分布, 局部发育破火山内湖相沉积; ② 破火山南部第一阶段流纹质角砾熔结凝灰岩与较老的九里坪组富晶体火山岩在空间上并列, 并以正断层带为界, 九里坪组火山岩构成了长屿破火山的围岩和可能的基底; ③ 长屿 3 个阶段的火山岩均主要分布在破火山内, 具有典型的火山碎屑流相的岩相学特征, 在垂向上依次叠置, 反映了第一阶段火山活动导致了塌陷破火山的形成, 第二阶段和第三阶段为破火山形成后喷发, 喷发产物进一步填充破火山; ④ 破火山内多处发育的流纹岩穹隆代表了破火山内部的多个火山岩浆通道。

关键词: 破火山; 硅质火山活动; 地质填图; 长屿洞天; 中国东南沿海

中图分类号: P588.14; P52

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2022)04-448-12

自晚侏罗世以来, 中国东南沿海火山活动的强度和范围逐步增大。白垩纪是中国东南沿海火山活动的高峰期, 通常认为其形成于古太平洋板块对华南板块俯冲作用的构造环境^[1-3]。这些火山活动产物在浙闽粤沿海地区构成 1 条长约 2 000 km、宽约 400 km 的巨型火山-侵入杂岩带(图 1)。火山岩分布广泛, 面积达 144 000 km²(图 1), 总厚度约 5 000 m, 具有阶段性和旋回性, 通常可分为上、下 2 个岩系, 且两岩系之间存在区域性不整合面^[5-6]。下岩系主要是流纹质火山岩和英安质火山岩以及零星分布的安山岩和玄武岩; 上岩系主要由大量流纹质火山岩和少量玄武岩构成^[3, 7-12]。

中国东南沿海地区火山岩及火山构造在一些区域呈现出集中分布的显著特点, 形成了多个大型

火山区(带), 如: 浙江括苍山、南雁荡山; 福建宁德、戴云山、安溪; 广东潮州^[12-13]等。中国东南沿海硅质火山岩的形成蕴含了重要的科学问题和区域基础地质问题: ① 大规模的流纹质岩浆是如何形成的? 是先存地壳的部分熔融, 还是幔源玄武质岩浆的结晶分异起主导作用? ② 流纹质火山岩与共生的浅成侵入体以及深成花岗岩有无成因联系? 是否代表了穿地壳岩浆系统的不同组成部分? ③ 大量破火山的形成机制是什么? 其对大陆地壳物质循环有何作用? ④ 是否存在超级火山喷发? 巨量火山喷发对中国东南沿海白垩纪古气候、古环境以及生命演化的影响如何? 其中, 普遍分布的破火山是中国东南沿海地区白垩纪火山活动的典型地质特征, 揭示破火山的结构、形成过程和机制对于研

* 收稿日期: 2022-05-23 修订日期: 2022-10-08 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 国家自然科学基金“酸性火山岩的成分分层与地壳岩浆系统演化(编号: 42172070)”项目资助。

第一作者简介: 贺振宇, 1976 年生, 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学研究。Email: zhenyuhe@ustb.edu.cn。

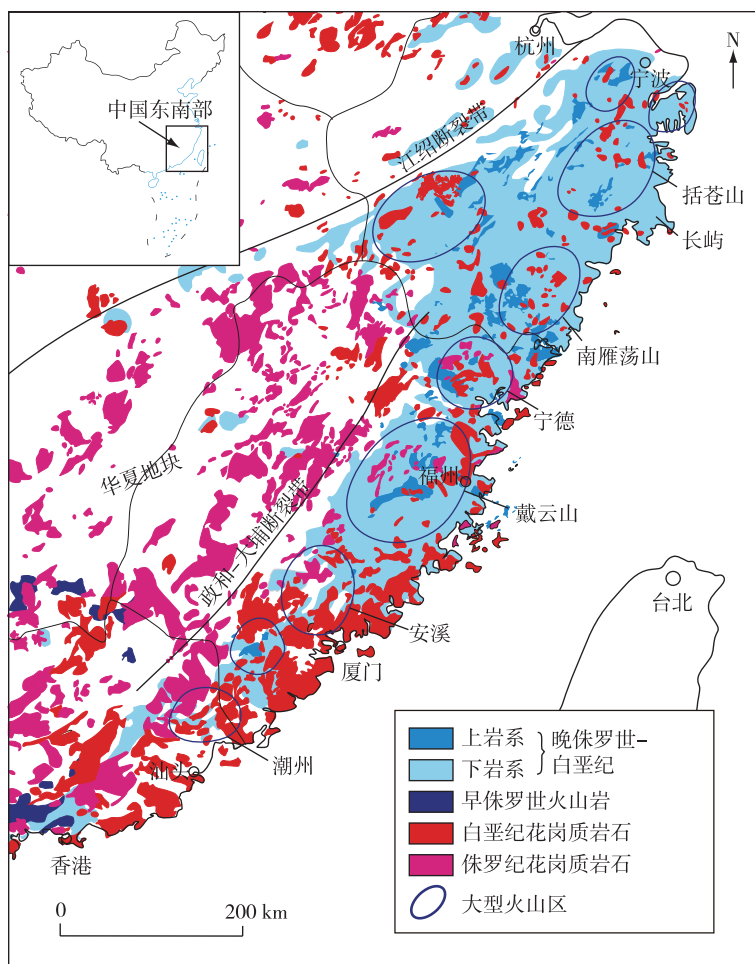


图 1 中国东南部地区晚中生代花岗岩、火山岩及大型火山区分布图^[4-5]

Fig. 1 Simplified geological map of SE China showing the distribution of the Late Mesozoic granitic and volcanic rocks and the large volcanic fields^[4-5]

究穿地壳岩浆系统、火山岩-侵入岩成因联系以及找矿勘查具有重要意义。本文简要综述了破火山的构造特征与形成过程,在此基础上,结合浙东温岭长屿破火山典型实例,具体阐述破火山的地质识别特征,这对进一步理解东南沿海巨型硅质火山作用及活动规律具有重要意义,对火山地质调查工作也具有重要的指导意义。

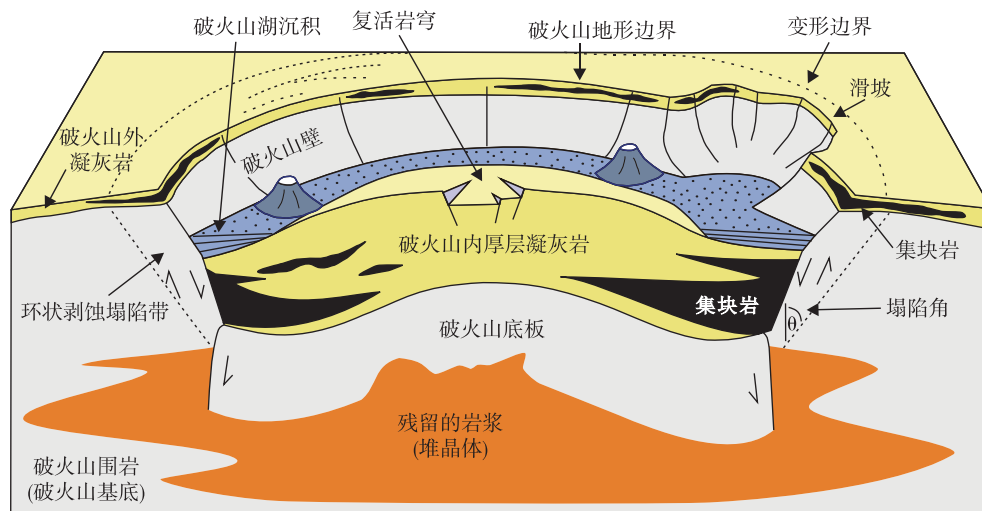
1 破火山的形成与演化

1.1 破火山结构、构造特征

破火山是火山塌陷形成的边部陡峭而底部平缓的近圆形洼地,在地貌上为负地形,直径可从<1 km 至上百 km,深度可以从几十 m 到几 km^[14]。典型的破火山如日本阿苏破火山(Aso)、美国新墨

西哥州瓦勒斯(Valles)破火山、印度尼西亚克拉卡托破火山(Krakatau)等^[15]。由此可见,破火山在定义上根本区别于火山喷发物质在岩浆通道口附近堆积形成的火山口(crater)。因此,我们建议“caldera”这一术语应翻译成破火山或者塌陷火山(例如文献[5]),而不是容易造成误解的“破火山口”。破火山在结构上一般包括陡崖状的边部、边界环状断裂带、破火山内填充物、侵入体和破火山基底等(图 2)^[14,17-19]。此外,恢复破火山的结构构造还应关注破火山外部岩石的特点,包括火山地层的厚度、产状和岩相等相对破火山内部的变化、较老的围岩及其与破火山内岩石的接触关系等(图 2)。

破火山形成以后,补给岩浆会导致残留岩浆和堆晶体活化上侵形成侵入体,一些浅成侵入体在深部可能逐渐过渡为深成岩基^[17-18]。经历一定程度

图 2 复活破火山的简化结构模型^[16]Fig. 2 Simplified model of a resurgent caldera^[16]

的剥蚀可以同时出露中央侵入体和破火山内火山岩,两者并列共生,具有密切的成因联系,记录了复杂的火山岩浆系统演化历史,也是识别古老剥蚀破火山的重要特征^[16,19-21]。中国东南沿海大量发育同时代、同空间、同源的火山岩与侵入岩,构成在全球具有典型性的巨型火山-侵入杂岩带(图 1)^[4-5,13,22]。此外,经历了剥蚀的破火山,其岩石分布一般大致呈圆形,且围岩相对较老,火山岩与围岩直接并列接触并有截然的界限,是古老破火山的重要识别特征^[16,23]。破火山的围岩可以是早期喷发的火山岩,也可以是较老的其他岩石,例如浙江芙蓉山破火山以环状断裂带为界与古生代强烈变质的陈蔡岩群并置,两者现今出露在近同一水平位置^[24]。

1.2 破火山塌陷类型

破火山的形成通常伴随着爆炸式的火山碎屑流喷发,一般认为与火山活动大量岩浆喷出导致深部岩浆房空虚(负压)以及岩浆房顶板塌陷有关^[17-19],塌陷与喷发的因果关系以及环状断裂与区域构造的关系是长期争议的问题^[25-27]。火山岩浆房的持续生长导致压力增加(过压),产生内倾或垂直的环状断裂,进而造成破火山的初始塌陷,并导致大量岩浆喷发^[26]。但是,这不排除一些破火山是浅部岩浆房压力迅速降低形成的,这种情况形成外倾的环状断裂。此外,岩浆房的形状和深度、岩浆成分和区域构造背景也是制约破火山形成及其喷发和塌陷方式的重要因素^[14,26,28-29]。学者们^[14,18-19]

总结出了 4 种主要的破火山塌陷方式,即凹陷式(Downsag)、活塞式(Piston)、碎片式(Piecemeal)和天窗式(Trapdoor),来描述不同的破火山形成机制(图 3)。也有学者^[28]提出这些不同的塌陷方式反映了破火山渐进的塌陷过程,天窗式塌陷则是由于外部因素导致了不对称的塌陷形状。

(1)凹陷式破火山。表现为宽阔的洼地,缺少环状断裂形成的破火山壁,地形上由边缘向塌陷中心缓慢倾斜(图 3(a)、图 3(b)),一般发生在环状断裂没有形成或者没有穿透地表的火山^[18]。这种破火山很少出现大型的硅质火山碎屑流喷发,而与玄武质熔岩流喷发有关,例如夏威夷基拉韦厄(Kilauea)火山。

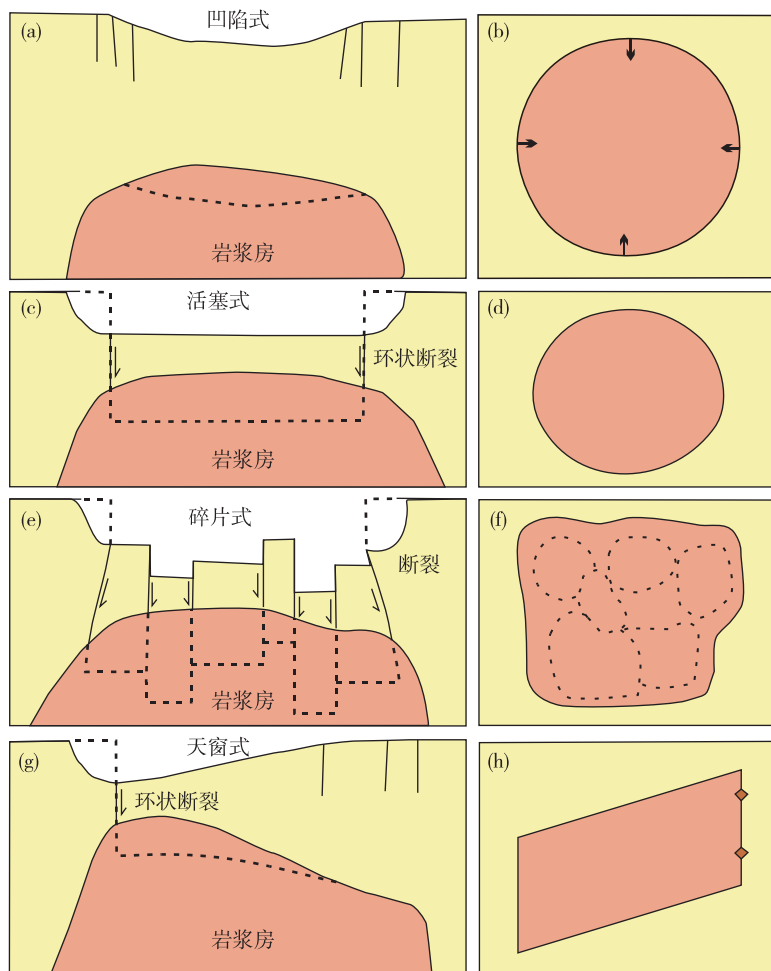
(2)活塞式破火山。通常以环状断裂为边界(图 3(c)、图 3(d)),浅部地壳岩浆房内大部分岩浆喷发之后,岩浆房顶板沿环状断裂以整个岩块方式塌陷到岩浆房。同时,破火山底板可能发育不同尺度的断裂。这种类型的破火山形成过程中的喷发产物在破火山内呈平面产出,且厚度变化不大,很多大型破火山都是活塞式破火山^[18]。

(3)碎片式破火山。表现为破火山底板呈多个独立的块体在垂向上差异移动,内部断裂特别发育(图 3(e)、图 3(f))^[18]。英格兰西北部奥陶纪斯卡费尔(Scafell)破火山是典型的碎片式塌陷破火山。这种破火山的形成与地下多个岩浆房的喷发有关,或者在火山喷发前,破火山底板已经被断裂破碎成多个块体^[28]。由于具有多个塌陷中心,破火山形成时

的喷发产物厚度变化较大。

(4)天窗式破火山。具有不对称塌陷的特点,发育不完整的环状断裂(图 3(g)、图 3(h))。天窗式破火山的形成可能与岩浆房不对称或者受先存断

裂的影响有关^[18]。此外,在环状断裂发育完整的情况下,当破火山底板块体不对称下沉时,也会产生类似“天窗”的塌陷构造^[28]。典型的如美国科罗拉多州的锡尔弗顿(Silverton)破火山。



(a)、(c)、(e)、(g)纵剖面;(b)、(d)、(f)、(h)横剖面;虚线表示破火山底板塌陷进入岩浆房的深度

图 3 破火山塌陷类型模型图^[14,18]

Fig. 3 Models showing different caldera collapse types^[14,18]

1.3 破火山的火山活动旋回

破火山从初始喷发到破火山的形成直至火山活动结束,经历了多阶段的火山喷发。这些不同阶段的火山活动是揭示破火山形成与演化的关键,大体可以分为塌陷前喷发、破火山形成喷发、破火山形成后喷发和破火山复活等多个阶段,且这些不同阶段可以反复作用,形成复杂的复式破火山(图 4)^[16-17,23,30]。

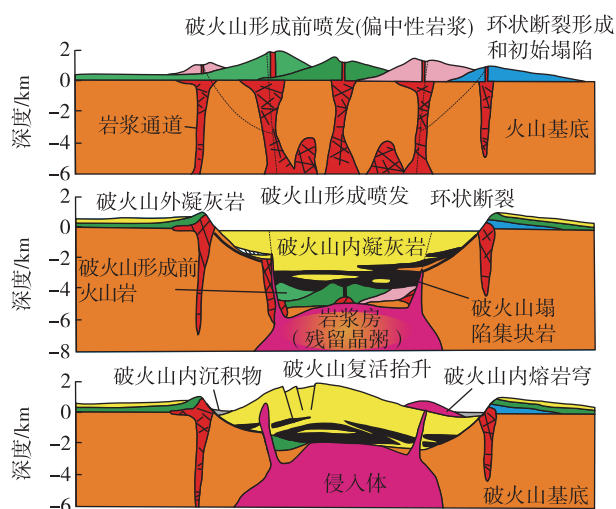
1.3.1 塌陷前的火山喷发(Pre-caldera eruption)

一般是小规模喷发,岩浆成分可以从玄武质至流

纹质,以偏中性岩浆为主,但一般不同于破火山形成的大规模喷发的岩浆成分。该阶段为浅部岩浆房的累积生长过程,由深浅多个岩浆房组成的破火山岩浆系统逐步形成,岩浆房的体积不断增加,岩浆分异程度也逐渐增加。喷发产物在破火山内部和外部均有分布,但由于塌陷作用和后期火山物质的填充,塌陷前的火山喷发产物在破火山内部一般较难出露。

1.3.2 破火山形成喷发(Caldera-forming eruption)

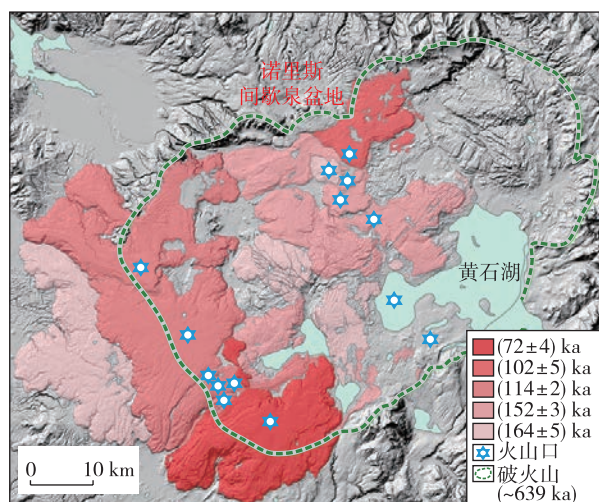
一般为大规模的火山喷发,喷发通道可能位于中

图4 破火山形成过程模式图^[17]Fig. 4 Schematic representation of the caldera cycle^[17]

心,也可能沿环状断裂分布,喷发产物具有较广的分布范围,并且在破火山内部和外部均有分布。火山碎屑流会在破火山内形成几千米厚的堆积物,厚度显著大于破火山外凝灰岩的厚度^[23]。破火山的形成及喷发具有阶段性,伴随着多阶段的破火山塌陷,一些火山可能反复经历多次的喷发、塌陷过程,形成嵌套式或重叠式的复式破火山(caldera complex)。地球上大部分破火山都是这种复式破火山。美国中部圣胡安中央(Central San Juan)复式破火山在 28.3~26.5 Ma 经历了 9 次大型喷发和多次塌陷,鱼峡谷(Fish Canyon)凝灰岩喷发形成了最大的破火山——拉加里塔(La Garita)破火山^[31]。黄石公园地区在 2.0~0.6 Ma 经历了 3 次主要喷发,形成了 3 个重叠的破火山^[32-33](图 5 显示了第三次喷发形成的破火山范围)。美国新墨西哥州瓦勒斯(Valles)破火山的形成经历了 2 次主要喷发,在 1.61 Ma 和 1.22 Ma 分别形成了班德利尔(Bandelier)凝灰岩的下部和上部^[34-35]。日本阿苏破火山在 266~86 ka 经历了 4 次喷发和塌陷^[14],而美国长谷(Long Valley)破火山仅经历 1 次喷发,形成了 Bishop 凝灰岩^[36]。

1.3.3 破火山形成后喷发(Post-caldera eruption)

破火山形成后的喷发产物和破火山湖沉积作用会填充破火山(图 2,图 4)。美国黄石破火山在喷发熔岩溪(Lava Creek)凝灰岩(约 639 ka)以后又经历了 30 多次的流纹岩流喷发,流纹岩总体积达 600 km³,填充了黄石破火山内部大部分区域。受破火山形成以后的区域断裂控制,火山口呈带状分

图5 黄石破火山形成后流纹岩流分布图^[32-33]Fig. 5 Map of post-caldera rhyolite lava flows from Yellowstone caldera^[32-33]

布(图 5)^[32-33]。浙东雁荡山第一阶段流纹英安质岩浆喷发形成了破火山,之后的多期火山活动在破火山内填充了厚度达数百米的流纹岩和流纹质火山碎屑岩^[4],形成了独特的雁荡山地貌景观(图 6)。此外,受岩浆补给作用的影响,该阶段岩浆偏原始且喷发产物相对复杂,可能包含了多种类型的包体。浙东雁荡山和小雄破火山形成后喷发的凝灰岩中均发育典型的与岩浆补给作用有关的富晶体包体和暗色微粒包体^[37-38]。

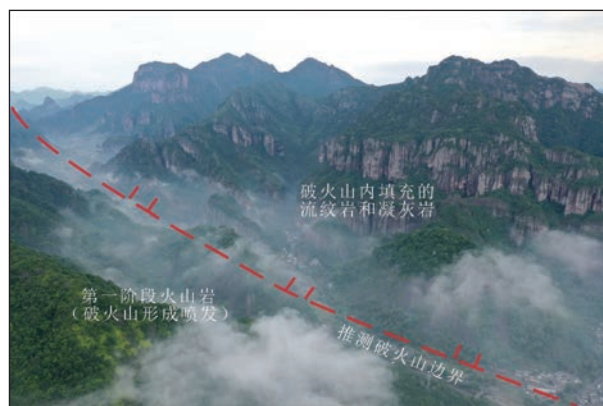


图6 破火山内填充的流纹岩和凝灰岩形成的雁荡山地貌(照片由叶金涛提供)

Fig. 6 The Yandangshan landform formed by caldera-fill rhyolites and tuffs (Photo by YE Jintao)

1.3.4 破火山复活(Caldera resurgence)

破火山塌陷以后,破火山底板在补给岩浆的作

用下会发生复活和抬升^[39]。破火山复活并不是立即发生在破火山塌陷之后,通常要经历较长的时间间隔。伴随着破火山的复活及抬升,有时在破火山内部形成分散的小规模火山喷发;岩浆也可以“挤出”形成穹隆或侵入破火山内的岩层形成浅成侵入体(图 4)。美国新墨西哥州瓦勒斯(Valles)破火山在塌陷以后的 5 万年内发生了底板的复活抬升,以及破火山内流纹岩穹隆的形成和凝灰岩喷发(持续到 0.52 Ma)。但经历了长时间的休眠之后,瓦勒斯(Valles)破火山在 5~6 万年前又发生了流纹岩喷发^[34-35,40]。破火山复活过程也会造成破火山内火山岩或地层的断裂、褶皱等发生变形^[39],这一过程还会促进地表水的渗入和循环以及岩浆-热液成矿系统的发育^[41-42]。GALETTO F 等^[43]提出破火山岩浆房中残留岩浆的冷却结晶会造成黏度增加,形成一个厚的具流变性质的过渡层,阻止补给岩浆以岩脉的形式上升,从而在岩浆房累积,并导致破火山底板的隆起和复活,而不是大规模的喷发。这一岩浆累积过程也可能成为新的破火山演化旋回的开始^[30,44-45]。

综上所述,揭示破火山演化的关键是识别不同的火山喷发旋回(破火山塌陷前、破火山形成、破火山塌陷后)、塌陷方式和过程、喷发产物在破火山内部和外部分布的差异、有无后期复活隆起和岩浆侵入、围岩和基底的时代和组成等^[14,23]。对于破火山调查和研究来说,以往普遍采用的“火山构造-火山岩相-火山岩性”的陆相火山岩区工作方法仍存在一定的局限和不足^[46]。围绕火山机构的识别,以“岩性-岩相”作为基本填图单位,虽然可以反映火山活动的基本特点和喷发历史,但是缺少对破火山的形成及演化过程的精细调查和研究,以及对破火山形成过程不同阶段及不同构造的识别^[46]。因此,我们认为更重要的是在识别破火山构造的基础上,从破火山形成和火山活动旋回的角度,精细厘定破火山塌陷前、破火山形成、破火山塌陷后、破火山复活等多阶段的岩浆喷发和侵入活动产物。此外,破火山基底及围岩的识别和区分也是破火山调查和研究的重要内容,这可能也是中国东南沿海破火山研究的难点,因为大部分破火山的围岩或基底往往是早期或稍早期火山活动的产物,两者在岩性、岩相和地球化学特征上都具有较大的相似性^[10]。

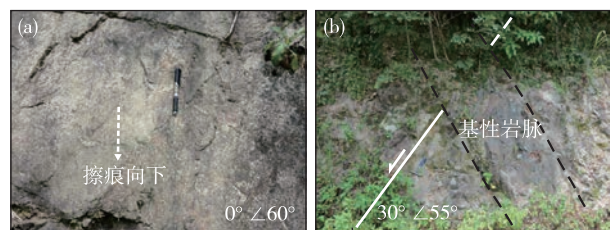
2 长屿破火山的典型识别特征

长屿破火山位于浙东温岭市东北部,属于浙东雁荡山大型火山喷发区的一部分。相邻地区的破火山构造还有雁荡山、和家坪、镇安、方山、楚门等。温岭市新河镇长屿硐天一带的凝灰岩具有长期的地下采石历史,遗存了 28 个大型地下采空硐室群^[47],成为雁荡山世界地质公园的主要园区之一。长屿破火山地处沿海丘陵平原区,山峰平地拔起,海拔 100~300 m,火山岩呈直径约 12 km 的圆形分布,周围为第四系沙土和黏土(图 7)。

据 1:5 万温岭县幅区域地质资料^①,长屿火山主要经历了 3 个火山喷发阶段,相应形成的 3 个阶段火山岩在垂向上依次叠置(图 7)。虽然 3 个阶段火山岩均以凝灰岩为主,但是由于岩性和岩石组合等差异,在地貌上具有一定区别。第一阶段火山岩大多数形成陡崖地貌,但一些地区夹有沉凝灰岩,较易风化,呈浑圆状山体(图 8(a)、图 8(b))。第二阶段火山岩岩层较厚,以陡崖地貌为主(图 8(c))。第三阶段火山岩位于山峰顶部,熔结程度高,致密坚硬(图 8(d))。长屿火山岩不同阶段凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,长屿火山活动时代为 97~96 Ma^[48],稍晚于临近的雁荡山破火山的火山活动时代^[4]。长屿火山的岩石组成、分布、与围岩关系等显示了塌陷破火山的典型地质特征。

2.1 破火山基底和塌陷构造

在破火山南部的石桥头镇一湖漫水库一带,第一阶段流纹质角砾熔结凝灰岩与较老的九里坪组富晶体凝灰岩在空间上并列,接触带发育一系列高角度正断层(图 9)。断层面上发育清晰的倾向擦痕(图 9(a)),可见早期的正断层被晚期的基性岩脉切穿(图 9(b)),基性岩脉的时代未知,但综合区域已有资料,其时代最可能为晚白垩世,这表明这些正断层可能形成于破火山形成过程中,因而最可能是破火山塌陷相关的断层。此外,两者岩性差别明显,前者以含有较多角砾、发育强熔结条带为特点(图 8(e)),后者晶屑含量高且粗大(2~4 mm),以钾长石、斜长石和石英为主(图 8(f)),两者表现出明显不同的地貌特征,前者陡崖发育,后者呈浑圆状山体。因此,推测两者之间以环状断裂为界,构成破火山的边界(图 10),而九里坪组火山岩可能构成长屿破火山的围岩和基底。



(a). 断层面及其擦痕, 断面指示正断层; (b). 正断层被后期基性岩脉切穿

图 9 与长屿破火山边缘塌陷相关的正断层

Fig. 9 Normal faults related to collapse along the margin of Changyu caldera



图 10 长屿破火山南部推测发环状断裂边界

Fig. 10 Speculated ring bounding fault along southern margin of the Changyu caldera

2.2 破火山形成和填充

长屿 3 个阶段火山岩均具有典型的火山碎屑流相岩相学特征, 发育强烈的条纹斑状结构, 岩性为流纹质熔结凝灰岩, 但具有不同的晶体及岩屑含量以及熔结程度等岩性变化。3 个阶段火山岩垂向上依次叠置, 主要分布在破火山内部, 总厚度约 570 m。在破火山外部的下保山、上芝岙、屏下村等地区分布第一阶段火山岩, 但未见第二阶段和第三阶段对应的火山岩(图 7)。因此, 我们认为第一阶段火山活动导致了塌陷破火山的形成, 火山岩在破火山内外均有分布。而第二阶段和第三阶段为破火山形成后喷发, 进一步填充了破火山, 喷发产物分布在破火山内部且叠置在第一阶段火山岩之上。尤其第二阶段火山岩以巨厚的凝灰岩为特征(图 8(c)、图 8(d)), 据地下开采揭露, 单层厚度可达近 100 m^[47]。

2.3 破火山内的沉积作用

第一阶段流纹质角砾熔结凝灰岩中夹凝灰质砂岩、粉砂岩和沉凝灰岩等沉积岩, 表明存在破火山内的沉积作用。在凤凰山露头观察到典型的正粒序递变层理, 单层厚几十厘米, 并被后期熔结凝灰岩覆盖(图 8(a)、图 8(b)), 反映了破火山内的湖相浊流沉积, 破火山湖盆边缘坡度较陡, 火山碎屑物质在重力作用驱动下以紊流方式被快速搬运至湖底深水区。

2.4 破火山内可能的岩浆通道

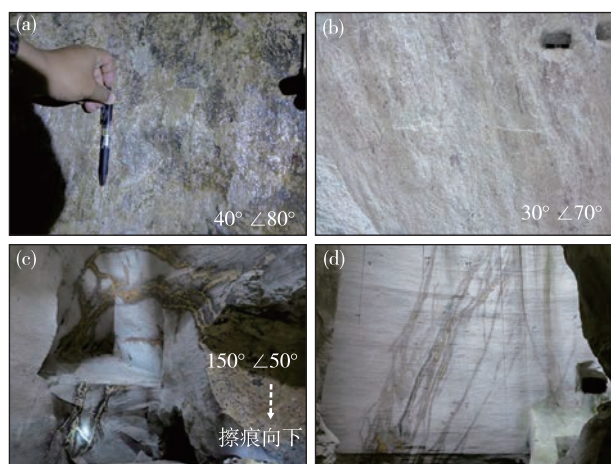
在花芯水库、晋岙、石岩头、白峰山等地(图 7), 发育了具球泡构造的流纹斑岩穹隆, 代表了破火山内部的多个火山岩浆通道(图 8(g))。在石夫人一带发育火山崩落相堆积的火山集块岩, 出露面积约 6 km², 集块大小主要为 15~50 cm, 少部分 > 1m, 以流纹岩为主(图 8(h)), 可能与岩浆通道垮塌有关, 指示了火山口附近位置。崇国寺一带发育流纹斑岩岩脉, 可能为岩浆沿破火山内的断裂侵入形成。但是, 这些火山岩浆通道与具体的火山喷发阶段的联系还需要进一步调查和研究。

2.5 后期断裂

长屿破火山除了经历一定程度的风化剥蚀外, 还普遍经历了后期的变形改造。本次调查与研究揭示了长屿地区发育两组火山活动之后的断层系统, 一组是 NW-SE 向逆冲断层系统(图 11(a)、图 11(b)), 另一组是 NE-SW 向正断层系统(图 11(c)、图 11(d))。其中, NE-SW 向正断层系统显著控制了山脉、山谷和水系的走向, 并控制了新生代的沉积(图 7), 是新生代构造, 切割了早期破火山构造。值得注意的是, 这套 NE-SW 向正断层及网脉状的次级破裂系统在地下岩石开采场地中也很发育, 随着岩石开采的进一步伸展, 富含铁质和钙质的地下水沿破裂系统蚀变岩石在众多地下采石洞内形成了类似巨幅抽象画的地质景观(图 11(c)、图 11(d))。

3 总结与认识

(1) 破火山的形成与爆炸式火山碎屑流喷发伴随的岩浆房顶板塌陷有关。破火山形成的火山喷发具有旋回性, 伴随着多旋回的破火山塌陷, 形成嵌套式或部分重叠的复式破火山。破火山形成后



(a)、(b).NW-SE 向逆冲断层及其擦痕,断层面不对称凹槽指示下盘下降;(c)、(d).NE-SW 向正断层及其网脉状的次级破裂系统

图 11 长屿破火山后期断裂特征

Fig. 11 Later faults in the Changyu caldera

可能被后续的喷发产物填充,还可能经历复活抬升,导致残留岩浆侵入火山岩形成浅成侵入体,经剥蚀出露火山-侵入杂岩。

(2)浙东长屿破火山的岩石组成、空间分布、与围岩关系等显示了塌陷破火山的典型地质特征。第一阶段火山活动导致了塌陷破火山的形成,第二阶段和第三阶段为破火山形成后喷发,进一步填充了破火山。破火山南部第一阶段流纹质角砾熔结凝灰岩与较老的九里坪组富晶体火山岩在空间上并列,并以正断层带为界,构成破火山的边界。

(3)破火山调查与研究的关键是在识别破火山构造的基础上,从破火山形成和火山活动旋回的角度,厘定破火山塌陷前、破火山形成、破火山塌陷后、破火山复活等多阶段的岩浆喷发和侵入活动产物。破火山的围岩、基底以及塌陷方式也是重要的调查和研究内容。

致谢:温岭市方山—长屿硐天旅游开发服务中心在野外考察及研究工作中给予了支持和帮助,在此表示感谢!

注释

① 冯长根,董尧鸿,鲍高德,等.温岭县幅 H-51-123-D 1:5 万区域地质图[R]. 杭州:浙江省地质矿产厅,浙江省区域地质调查大队,1995.

参考文献

- [1] JAHN B M. Mesozoic thermal events in southeast China[J]. *Nature*, 1974, 248: 480-483.
- [2] ZHOU X, SUN T, SHEN W, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in south China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29: 26-33.
- [3] HE Z Y, XU X S. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction[J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 208-221.
- [4] YAN L L, HE Z Y, JAHN B M, et al. Formation of the Yandangshan volcanic-plutonic complex (SE China) by melt extraction and crystal accumulation[J]. *Lithos*, 2016, 266/267: 287-308.
- [5] 谢家莹,陶奎元,尹家衡,等.中国东南大陆中生代火山地质及火山-侵入杂岩[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [6] XIE J Y, TAO K Y, YIN J H, et al. Mesozoic volcanic geology and volcano-intrusive complexes of southeast China continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [7] XING G, LI J, DUAN Z, et al. Mesozoic-Cenozoic volcanic cycle and volcanic reservoirs in east China[J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32: 742-765.
- [8] CHEN C H, LEE C Y, LU H Y, et al. Generation of Late Cretaceous silicic rocks in SE China: Age, major element and numerical simulation constraints [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31: 479-498.
- [9] LIU L, XU X, ZOU H. Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences in southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo-Pacific subduction [J]. *Lithos*, 2012, 154: 166-180.
- [10] 王加恩,刘远栋,汪建国,等.浙江丽水地区磨石山群火山岩时代归属[J]. *华东地质*, 2016, 37(3): 157-165.
- [11] WANG J E, LIU Y D, WANG J G, et al. Age assignment of the Moshishan Group volcanic rocks in the Lishui area, Zhejiang Province [J]. *East China Geology*, 2016, 37(3): 157-165.
- [12] ZHANG J H, YANG J H, CHEN J Y, et al. Genesis of late Early Cretaceous high-silica rhyolites in eastern Zhejiang Province, southeast China: A crystal mush

- origin with mantle input[J]. *Lithos*, 2018, 296/299: 482-495.
- [11] ZHAO L, GUO F, ZHANG X, et al. Cretaceous crustal melting records of tectonic transition from subduction to slab rollback of the Paleo-Pacific Plate in SE China[J]. *Lithos*, 2021, 384: 105985.
- [12] XU X, ZHAO K, HE Z, et al. Cretaceous volcanic-plutonic magmatism in SE China and a genetic model [J]. *Lithos*, 2021, 402/403: 105728.
- [13] YAN L, HE Z, BEIER C, et al. Geochemical constraints on the link between volcanism and plutonism at the Yunshan caldera complex, SE China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2018, 173 (1): 4.
- [14] COLE J W, MILNER D M, SPINKS K D. Calderas and caldera structures; a review[J]. *Earth Science Reviews*, 2005, 69(1): 1-26.
- [15] GEYER A, MARTÍ J. The new worldwide collapse caldera database (CCDB): A tool for studying and understanding caldera processes[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 175 (3): 334-354.
- [16] BRANNEY M, ACOCELLA V. Calderas [M]// HARALDUR S. *The encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, 2015: 299-315.
- [17] LIPMAN P W. The roots of ash flow calderas in western North America: windows into the tops of granitic batholiths[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B10): 8801-8841.
- [18] LIPMAN P W. Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry [J]. *Bulletin of Volcanology*, 1997, 59(3): 198-218.
- [19] KENNEDY B M, HOLOHAN E P, STIX J, et al. Magma plumbing beneath collapse caldera volcanic systems [J]. *Earth Science Reviews*, 2018, 177: 404-424.
- [20] GELMAN S E, DEERING C D, BACHMANN O, et al. Identifying the crystal graveyards remaining after large silicic eruptions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 403: 299-306.
- [21] 贺振宇, 颜丽丽. 锆石微量元素地球化学对硅质火山岩浆系统的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(5): 939-951.
- HE Z Y, YAN L L. Zircon trace element geochemistry constrains on the silicic volcanic system[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(5): 939-951.
- [22] 王德滋, 周金城, 邱检生, 等. 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): 487-498.
- WANG D Z, ZHOU J C, QIU J S, et al. Characteristics and petrogenesis of Late Mesozoic granitic volcanic-intrusive complexes in Southeastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(4): 487-498.
- [23] GOODAY R J, BROWN D J, GOODENOUGH K M, et al. A proximal record of caldera-forming eruptions: the stratigraphy, eruptive history and collapse of the Palaeogene Arran caldera, western Scotland[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2018, 80(9): 70.
- [24] 俞云文. 浙江芙蓉山破火山口构造特征及火山-侵入杂岩的成岩物质来源[J]. *中国区域地质*, 1993, 12(1): 35-44.
- YU Y W. The features of the mount Furong caldera structure in Zhejiang-Material source of the intrusive complex[J]. *Regional Geology of China*, 1993, 12(1): 35-44.
- [25] MCBIRNEY A R. An historical note on the origin of calderas[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1990, 42(3): 303-306.
- [26] GUDMUNDSSON A. Formation of collapse calderas [J]. *Geology*, 1988, 16(9): 808-810.
- [27] GRAY J P, MONAGHAN J J. Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 135(3): 259-283.
- [28] ACOCELLA V. Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas[J]. *Earth Science Reviews*, 2007, 85(3): 125-160.
- [29] BACHMANN O, HUBER C. Silicic magma reservoirs in the Earth's crust[J]. *American Mineralogist*, 2016, 101(11): 2377-2404.
- [30] BOUVET DE MAISONNEUVE C, FORNI F, BACHMANN O. Magma reservoir evolution during the build up to and recovery from caldera-forming eruptions—A generalizable model? [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 218: 103684.
- [31] LIPMAN P W. Incremental assembly and prolonged consolidation of Cordilleran magma chambers: Evidence from the Southern Rocky Mountain volcanic field[J]. *Geosphere*, 2007, 3(1): 42-70.
- [32] CHRISTIANSEN R L, LOWENSTERN J B, SMITH R B, et al. Preliminary assessment of volcanic and hydrothermal hazards in Yellowstone national park and

- vicinity[R]. US Geological Survey open-file report 2007—1071; 2007.
- [33] STELTEN M E, COOPER K M, VAZQUEZ J A, et al. Mechanisms and timescales of generating eruptible rhyolitic magmas at Yellowstone Caldera from zircon and sanidine geochronology and geochemistry [J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56(8): 1607-1641.
- [34] WOLFF J A, GARDNER J N. Is the Valles caldera entering a new cycle of activity? [J]. *Geology*, 1995, 23(5): 411-414.
- [35] KENNEDY B, WILCOCK J, STIX J. Caldera resurgence during magma replenishment and rejuvenation at Valles and Lake City calderas[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2012, 74(8): 1833-1847.
- [36] HILDRETH W. Volcanological perspectives on Long Valley, Mammoth Mountain, and Mono Craters: Several contiguous but discrete systems[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 136(3/4): 169-198.
- [37] 高丽, 洪文涛, 杨祝良, 等. 浙东小雄破火山晚白垩世火山-侵入杂岩成因及岩浆演化[J]. *华东地质*, 2019, 40(3): 161-169.
- GAO L, HONG W T, YANG Z L, et al. Petrogenesis and magmatic process of Late Cretaceous volcano-intrusive complex from Xiaoxiong Caldrea, Eastern Zhejiang Province[J]. *East China Geology*, 2019, 40(3): 161-169.
- [38] 颜丽丽, 贺振宇. 岩浆补给作用对硅质火山岩浆系统演化的制约[J]. *地质学报*, 2022, 96(5): 1697-1710.
- YAN L L, HE Z Y. Influence of magma recharge on the evolution of silicic volcanic system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(5): 1697-1710.
- [39] CORRADINO M, PEPE F, SACCHI M, et al. Resurgent uplift at large calderas and relationship to caldera-forming faults and the magma reservoir: New insights from the Neapolitan Yellow Tuff caldera (Italy) [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2021, 411: 107183.
- [40] PHILLIPS E H, GOFF F, KYLE P R, et al. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the duration of resurgence at the Valles caldera, New Mexico [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112: B08201.
- [41] HULEN J B, NIELSON D L, GOFF F, et al. Molybdenum mineralization in an active geothermal system, Valles caldera, New Mexico[J]. *Geology*, 1987, 15(8): 748-752.
- [42] STIX J, KENNEDY B, HANNINGTON M, et al. Caldera-forming processes and the origin of submarine volcanogenic massive sulfide deposits [J]. *Geology*, 2003, 31(4): 375-378.
- [43] GALETTO F, ACOCELLA V, CARICCHI L. Caldera resurgence driven by magma viscosity contrasts [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1750.
- [44] BACHMANN O, DEERING C D, RUPRECHT J S, et al. Evolution of silicic magmas in the Kos-Nisyros volcanic center, Greece: A petrological cycle associated with caldera collapse[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, 163(1): 151-166.
- [45] FORNI F, DEGRUYTER W, BACHMANN O, et al. Long-term magmatic evolution reveals the beginning of a new caldera cycle at Campi Flegrei[J]. *Science advances*, 2018, 4(11): 9401.
- [46] 褚平利, 邢光福, 洪文涛, 等. 陆相火山岩区填图方法的实践——以嵊州新生代玄武岩为例[J]. *地质通报*, 2017, 36(11): 2036-2044.
- CHU P L, XING G F, HONG W T, et al. Practice of the mapping method in continental volcanic rocks outcrop area: A case study of Cenozoic basalt in Shengzhou, Zhejiang Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(11): 2036-2044.
- [47] 祝介旺, 李丽慧, 傅燕, 等. 温岭大型古地下采石场长屿硐天凌霄硐洞室群工程地质条件评价[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(4): 772-778.
- ZHU J W, LI L H, FU Y, et al. Evaluation on engineering geological conditions of Lingxiao caverns among Changyudongtian large ancient underground quarry at Wenling, Zhejiang province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(4): 772-778.
- [48] 贺振宇, 颜丽丽, 褚平利, 等. 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.
- HE Z Y, YAN L L, CHU P L, et al. Volcanological evolution and paleoenvironment of the Late Cretaceous Changyu volcano in the coastal SE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 38(5): 1419-1442.

Typical recognition features of the Changyu caldera in the eastern Zhejiang Province

HE Zhenyu¹, YAN Lili², CHU Pingli³, ZHANG Jin⁴

(1. *School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

2. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

3. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Calderas are widely distributed in the huge Cretaceous silicic volcanic-plutonic complex belt along coastal area of Southeast China. Their genesis and related volcanic activity processes are important issues for understanding the tectono-magmatism and mineralization in SE China. Calderas are subcircular volcanic depressions. The formation of the caldera is associated with the collapse of the magma chamber roof following with large-volume pyroclastic-flows during explosive eruptions. The eroded caldera can be well identified by the juxtaposition of the intracaldera volcanic rocks at the same level as older surrounding rocks. The formation of caldera commonly undergoes multi-stage volcanic activity processes, including pre-caldera eruption, caldera-forming eruption, post-caldera eruption and caldera resurgence. Identifying the different eruption stages and magmatic activities are crucial for understanding the formation and evolution of calderas. The Changyu caldera from eastern Zhejiang, coastal SE China has typical recognition features, including: ① The volcanic rocks are distributed as nearly circular geometry with a diameter of 12 km, and lake sedimentary rocks were locally developed within the caldera; ② The rhyolitic lapilli welded tuff of the first unit juxtaposed against older crystal-rich volcanic rocks of Jiuliping Formation along the south margin of the caldera and they are bounded by normal fault zone. The Jiuliping Formation constitutes the wall and the possible basement of Changyu caldera; ③ The first, second and third tuff units of Changyu caldera are mainly distributed within the caldera, showing typical petrological characteristics of pyroclastic-flow facies. They are vertically distributed from base to top, suggesting that the eruption of the first unit led to the formation of the collapse caldera, while the second and the third volcanic units were formed by post-caldera eruptions, which further filled the caldera; ④ Rhyolite domes were developed in several places within the caldera, representing volcanic magma conduits of the caldera.

Key words: calderas; silicic volcanic activity; geological mapping; Changyudongtian; coastal southeast China