

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.04.006

引用格式:褚平利,靳国栋,张炜,等.浙江苍南望州山破火山地质特征及其形成演化[J].华东地质,2022,43(4):460-473.(CHU P L, JIN G D, ZHANG W, et al. Geologic features and evolution of Wangzhoushan caldera in Cangnan County, Zhejiang Province [J]. East China Geology, 2022, 43(4):460-473.)

## 浙江苍南望州山破火山地质特征及其形成演化

褚平利<sup>1,2,3</sup>, 靳国栋<sup>2</sup>, 张 炜<sup>2</sup>, 陈 荣<sup>2</sup>, 范飞鹏<sup>2</sup>, 段 政<sup>1,2</sup>, 余明刚<sup>2</sup>,  
赵希林<sup>2,3</sup>, 李龙明<sup>3</sup>, 贺振宇<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;  
3. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;  
4. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 相对于保存完好的新火山而言, 古老火山由于经受长期剥蚀与后期构造改造能够直接出露不同时期和深度的物质组成, 是火山机构解剖的理想对象。通过对古火山机构进行调查及研究, 对于理解火山喷发过程和浅部岩浆系统演化具有重要研究意义, 同时对活动火山的监测及灾害评估具有实践意义。文章通过系统的野外地质调查和综合研究, 对浙江苍南地区望州山古火山进行了详细的剖析, 根据岩性岩相平面上呈环状展布且向核部由老变新, 产状围斜内倾, 发育典型的环状、放射状断层以及晚期中央侵入相岩穹等特征, 确认其是一座典型的复活破火山, 其形成演化先后经历了初始断陷与小规模喷发、普林尼式喷发、溢流式喷发、大规模普林尼式喷发和破火山塌陷、晚期复活 5 个阶段。

**关键词:** 望州山复活破火山; 火山演化; 火山岩相; 火山断裂构造; 浙江苍南

**中图分类号:** P588.14; P52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2022)04-460-14

火山是连接地球内部系统和表层系统的重要纽带, 是能够直接反映地球深部存在岩浆并产生丰富矿产资源的地球动力学现象。火山喷发也是地球内部能量释放的直观表现, 以及地球深部 CO<sub>2</sub> 等挥发性物质排放至地表的主要途径之一, 对于促进地球多圈层碳交换与深部碳循环具有重要作用。同时, 火山喷发会引发火灾、泥石流、地震、强降雨及酸雨等多种地质灾害, 对地球的生物宜居性产生了重要影响<sup>[1-5]</sup>, 大规模火山喷发引起的剧烈的气候环境变化可能是导致地质历史时期 5 次生物大灭绝的主要原因<sup>[6]</sup>。

火山的分布与大地构造环境具有密切的联系。地球上的活火山有 1 300~1 500 座, 绝大多数分布在岩石圈板块的接触边界上, 少数分布在板块内部。全球主要有环太平洋火山带、大洋中脊火山

带、地中海—喜马拉雅火山带及东非裂谷火山带等。其中, 环太平洋火山带的活火山分布数量最多也最集中, 是全球最大的活火山带<sup>[7]</sup>。

中国东南沿海地区中生代—新生代火山岩带是环太平洋火山岩带的重要组成部分。其中中生代火山活动规模大、持续时间长(晚三叠世—晚白垩世), 火山活动高峰期在白垩纪早期, 集中展布于余姚—丽水—政和—大埔—莲花山断裂带以东, 90% 以上是流纹质火山岩<sup>[8]</sup>, 面积达 144 000 km<sup>2</sup>, 总厚度约 5 000 m<sup>[9]</sup>。该火山岩带也是中国火山地质调查研究程度最高的区域, 数十年的地质调查与研究系统查明了不同级别的火山构造近 300 个, 并对其中的百余个三级火山机构(破火山、火山穹隆、锥火山等)进行了详细的解剖<sup>[10-12]</sup>。

\* 收稿日期: 2022-05-25 修订日期: 2022-09-11 责任编辑: 谭桂丽

**基金项目:** 中国地质调查局“武夷山松溪—庆元地区区域地质调查(编号: DD20190045)”、“华东地区区域基础地质调查(编号: DD20221633)”和国家自然科学基金“酸性火山岩的成分分层与地壳岩浆系统演化(编号: 42172070)”项目联合资助。

**第一作者简介:** 褚平利, 1985 年生, 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事火山岩地质调查与研究工作。Email: 343938990@qq.com。

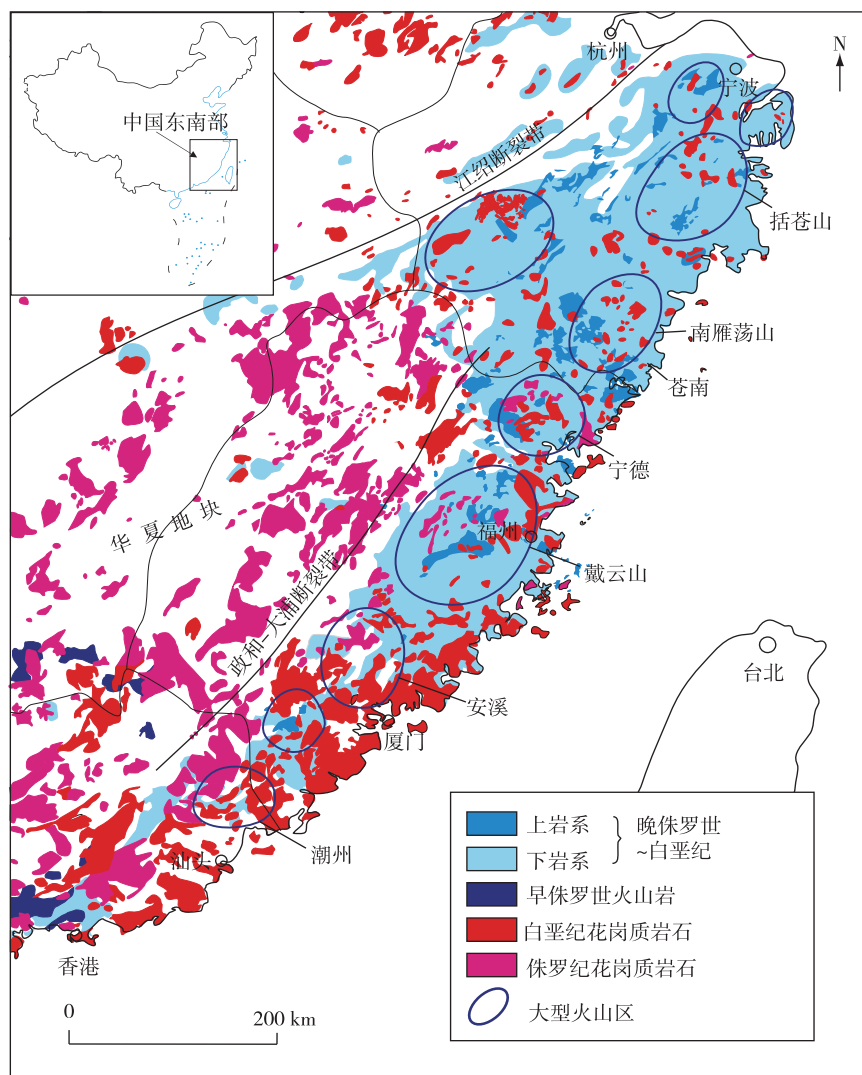
**通信作者简介:** 贺振宇, 1976 年生, 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学研究工作。Email: zhenyuhe@ustb.edu.cn。

火山作用的复杂性以及火山喷发的难预测性是当前国际地学前沿与热点,其受制于对地壳浅部岩浆房形态、内部结构与岩浆演化过程多样性的理论认知有限,目前还难以建立有效的火山深部探测技术与解译方法。相对新生代火山,古老火山一般受到了后期构造抬升和剥蚀作用的改造,可以暴露早期的火山喷发产物、内部的岩浆通道、岩浆房,甚至伴生的浅成侵入体等,从而为揭示火山岩浆系统演化和火山活动过程提供了重要窗口<sup>[13-16]</sup>。中国东南沿海地区众多的中生代古火山经历了 1 亿多年来不同程度的剥蚀作用,为直观揭示火山物质组

成,解剖火山内部结构提供了理想的野外实验室。本文在前人研究工作的基础上,通过地质填图对浙江苍南地区望州山古火山进行了详细的野外地质调查及室内综合研究,重塑古火山活动过程,以期研究火山喷发机制提供理论参考。

## 1 地质背景

中国东南沿海地区出露大面积的中生代—新生代陆相火山岩,构成长约 1 200 km、宽约 500 km 的东南沿海火山岩带,是环太平洋火山岩带的重要组成部分<sup>[17]</sup>(图 1)。中国东南沿海地区中生代火山



①.江山—绍兴断裂带;②.郴州—临武断裂带;③.余姚—丽水—政和—大埔—莲花山断裂带;④.温州—镇海—福安—南靖断裂带;⑤.赣江断裂带;⑥.襄樊—广济断裂带;⑦.郟庐断裂带

图 1 中国东南部晚中生代花岗岩和火山岩以及大型火山区分布图<sup>[10,16]</sup>

Fig. 1 Simplified geological map of SE China showing the distribution of the Late Mesozoic granitic and volcanic rocks and the large volcanic fields<sup>[10,16]</sup>

活动具有显著的旋回性,表现为不同时期火山活动产物在空间展布、地质特征上具有明显的差异性<sup>[9]</sup>。以往对包括中国东南沿海在内的华南中生代(主要集中于侏罗纪—白垩纪)火山岩研究中,不同学者根据岩石组合类型、区域性不整合面、时空展布特征等差异性,曾提出多种火山活动旋回划分方案,后来逐步统一为早侏罗世(195 ~ 175 Ma)、中侏罗世—晚侏罗世(173 ~ 146 Ma)、早白垩世早期(145 ~ 115 Ma)、早白垩世晚期—晚白垩世(113 ~ 85 Ma) 4 个火山活动旋回<sup>[9,18-22]</sup>(图 1)。前人根据岩性岩相组合、接触关系、生物地层及同位素年龄等资料,将中生代火山岩划分为上、下 2 个岩系(图 1)<sup>[23-24]</sup>。浙江地区下火山岩系主要为浙东南地区磨石山群和浙西北地区建德群<sup>[25]</sup>;上火山岩系主要为永康群、天台群和衢江群<sup>[23-24]</sup>,分布于新昌、天台、小雄、丽水、金衢、矾山等断陷盆地中。矾山断陷盆地(也称矾山火山构造洼地)主要由永康群陆源碎屑沉积岩和长英质火山岩组成,自下而上可进一步划分为馆头组( $K_1^2g$ )、朝川组( $K_1^2c$ )和小平田组( $K_1^2x$ ),与下伏磨石山群呈断层或不整合接触。

## 2 望州山破火山地质特征

望州山破火山位于浙江省苍南县藻溪镇一带,处于东南沿海火山岩带温州—镇海火山喷发区、平阳—普陀深大断裂和龙泉—苍南大断裂交汇处(图 2(a)),是发育于矾山火山构造洼地内的一座破火山,平面上呈椭圆形,NW 向长轴 16 km,SE 向短轴 9 km,面积约 400 km<sup>2</sup>(图 2(b)),地貌上为平均海拔 300 ~ 700 m 的中低山区。望州山破火山的火山活动产物主要为小平田组中酸性熔岩及火山碎屑岩,在破火山中部见有晚期复活的正长花岗(斑)岩,破火山形成时代为 97 ~ 89 Ma(笔者未发表数据)。火山地层总体围绕火山喷发中心呈围斜内倾分布,局部受岩体侵位影响略有变化。破火山环状断裂和放射状断裂极为发育并限定了破火山的边界,沿环形断裂断续发育晚期的岩墙、岩脉,同时还发育碎裂岩和硅化破碎带。

### 2.1 断裂系统

破火山的形成及演化往往伴随着一系列环状和放射状断裂的形成<sup>[26-28]</sup>,例如美国的瓦勒斯(Valles)破火山<sup>[29]</sup>和博南萨(Bonanza)破火山<sup>[30]</sup>。

望州山破火山及周边断裂发育,纵横交错,相当复杂。按其形成时间及性质,可分为破火山形成前断裂(Pre-caldera faults)、破火山形成期断裂(Caldera-forming faults)和破火山形成后断裂(Post-caldera faults)三类。

#### 2.1.1 破火山形成前断裂

破火山形成前断裂是控制古火山基底沉陷并为火山喷发提供通道的区域性断裂,以 NE 向和 NW 向为主。NW 向断裂因具多期活动特征,破火山形成前的构造行迹多被最晚期的构造行迹所掩盖。NE 向断裂以矾山—南宋一带最发育,以往称之为矾山构造带<sup>[31]</sup>。带宽 7 ~ 9 km,延伸长 > 10 km,向西南延伸至福建省霞浦县,北东端被后期望州山破火山环状断裂截切。断层性质以逆断层为主,少部分为正断层,多兼具平移断层性质,倾角 60° 以上,局部直立。多数发育破碎带,宽 3 ~ 4 m,长 2 ~ 3 km,带内见构造透镜体、片理化、直立岩层带等,有时见花岗斑岩脉充填。

(1)岭头断裂。位于矾山北约 2 km 的岭头村。走向北东 60°,断面倾向北西,倾角 70° 以上。破碎带宽 3 ~ 4 m,延伸长约 2 km。带内充填流纹斑岩脉。断裂两侧岩石均被挤压成透镜状角砾(图 3(a),图 4(a)),早期为逆断层,晚期为正断层。

(2)矾山断裂。该断裂地貌特征明显,断裂延伸处多为沟谷,遥感影像显示具明显线性构造。走向 30° ~ 40°,倾向 SE,倾角 40° ~ 75°,在矾山镇西侧出露良好。断裂带宽约 5 m,受断裂构造影响,两侧岩层可见牵引现象,可见断层角砾岩和构造透镜体,近断裂面可见硅化、叶腊石化、明矾石化和镜铁矿化等矿化蚀变现象。断层面波状弯曲,断面上可见清晰的擦痕和阶步,指示正断层特征(图 3(b),图 4(b))。

#### 2.1.2 破火山形成期断裂

(1)环状断裂群。望州山破火山环状断裂十分发育(图 2(b)),自溪心村(北西)依次经挺南(西)、笋脚(南西)、三条溪(南)、沙坡(南东)至白玉潭(东)一带,北东侧及北侧因第四系覆盖而不明显,有规律地组成一个向西突出的半环形,断续延伸 20 余 km。尤其以溪心村—挺南—笋脚—三条溪一带表现最为明显,多条弧状、半环状断裂成群密集出现。该环状断裂在地貌上表现为一系列环形山脉、水系组成一个向西突出的半环状-弧状地貌形态,清楚地展示出破火山环状

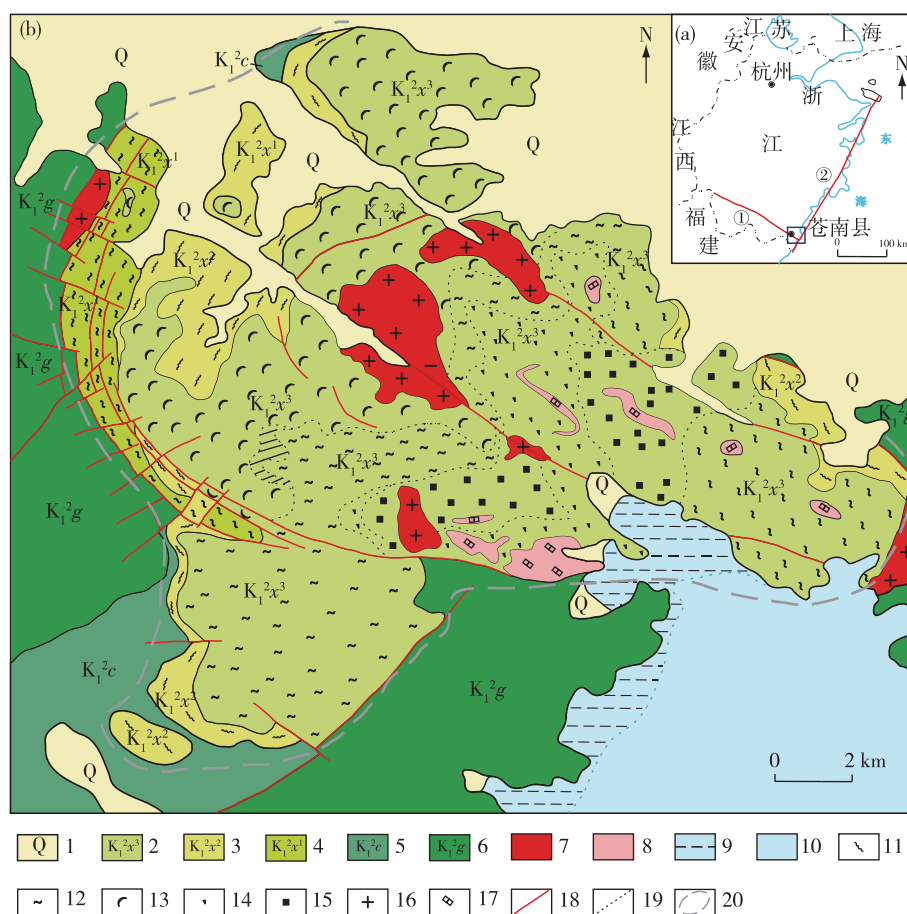


图 2 望州山破火山火山岩相构造图

Fig. 2 Volcanic lithofacies-tectonic of Wangzhoushan caldera

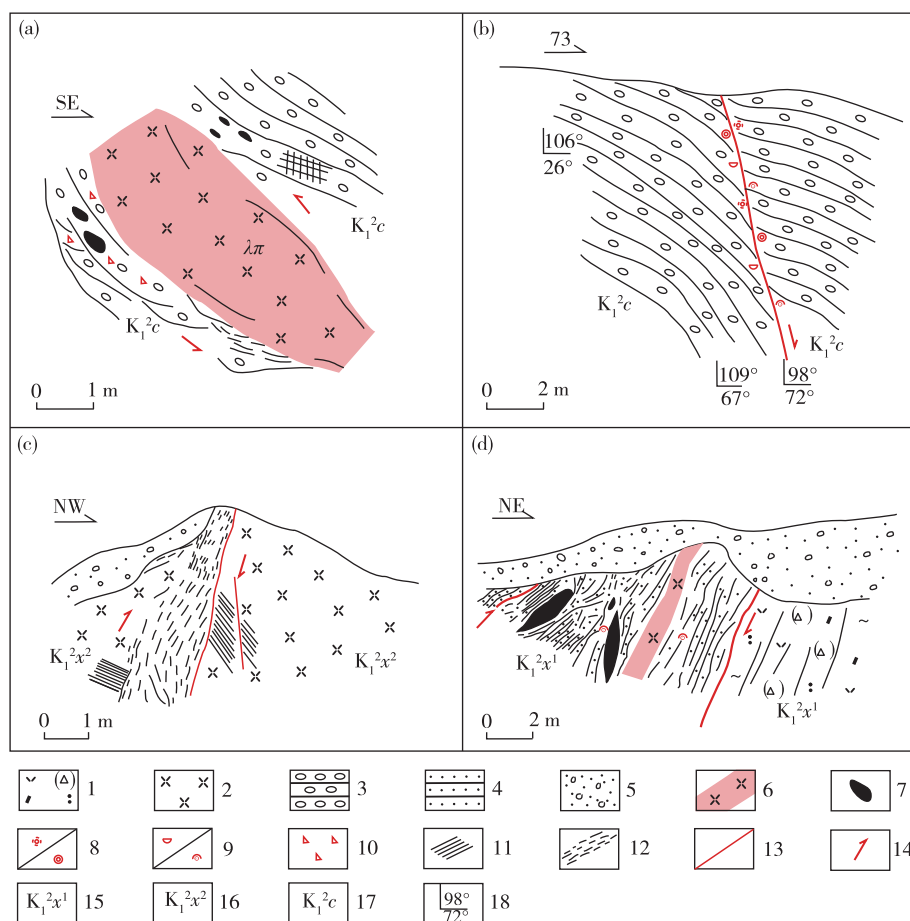
构造的概貌。环状断裂亦为破火山的构造边界,控制破火山内凝灰岩的空间展布。

环状断裂的主要特征是:破碎带明显,带内发育构造透镜体、劈理、片理化带;局部充填花岗斑岩、流纹斑岩等岩脉。断面舒缓波状,断面可见水平、斜冲擦痕。岩层走向有规律地伴随环状断裂弯转。断层性质多样,正断层和逆断层均发育,部分兼具平移性质。现择主要断裂详述如下。

盛陶村断裂。走向北东  $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，倾向 NW，倾角  $80^{\circ}$  以上。断面呈舒缓波状，强烈破碎带宽约 1 m，带内片理化十分明显，并发育构造透镜体(图 3(c))。断裂西侧流纹岩中发育走向  $110^{\circ}$  羽状劈理，与断裂相交的锐角亦指示上盘具有向 NW 方向运动的逆断层特征。

吕家旺断裂。在吕家旺一带走向北西  $35^{\circ}$ ，倾向 SW，倾角  $85^{\circ}$  以上。至大垵一带走向渐转为北西  $75^{\circ}$ ，倾向 NNE，倾角  $65^{\circ}$ ，局部直立。破碎带宽  $10\sim 20$  m，带内岩层直立乃至倒转，具明显的片理化特征，另见构造透镜体，核部由火山岩或粉砂岩组成，透镜体长轴方向及岩层走向与断裂走向完全一致，并充填流纹斑岩岩脉(图 3(d))。断面呈舒缓波状，片状方解石沿断壁附生，斜冲擦痕发育，指示了左行平移逆断层特征。该断层具有明显的多期活动特征，早期以左行平移逆断层为主，晚期为正断层。

(2)放射状断裂群。与破火山形成有关的放射状断裂,主要发育在蕉浦岭—外西希—龙船坑—土人坑—大埕一带。断裂性质以平移断层和正断层



(a). 岭头断裂; (b). 矾山断裂; (c). 盛陶村断裂; (d). 吕家旺断裂; 1. 流纹质含角砾熔结凝灰岩; 2. 流纹岩; 3. 砾岩; 4. 砂岩; 5. 浮土层; 6. 流纹斑岩脉; 7. 构造透镜体; 8. 硅化/镜铁矿化; 9. 明矾石化/叶腊石化; 10. 断层角砾岩; 11. 劈理; 12. 片理化; 13. 断层; 14. 断层运动方向; 15. 小平田组一段; 16. 小平田组二段; 17. 朝川组; 18. 产状

图3 浙江省苍南县断裂构造素描图

Fig. 3 Geological sketches of faulted structure in Cangnan County, Zhejiang Province

为主。破碎带普遍见构造角砾岩,断面粗糙不平,且有石英脉充填等典型张性断层特征。断裂规模不大,一般延伸长 2~3 km,并切割环状断裂群,但错距不大。

综上所述,望州山破火山环状和放射状断裂成群密集出现,是在一定的边界条件下,围绕着一个中心形成的产物,与望州山破火山的形成、演化密切相关。环状断裂的形成与破火山塌陷密切相关,而放射状断裂的形成主要与破火山复活阶段岩体的上涌形成的膨胀和隆起有关<sup>[28-29]</sup>。

### 2.1.3 破火山形成后断裂

破火山形成后断裂指叠加于前两类断裂之上的后期断裂以及一些破坏已形成的火山机构的断裂。这些断裂大部分可以在卫星照片上直接观察

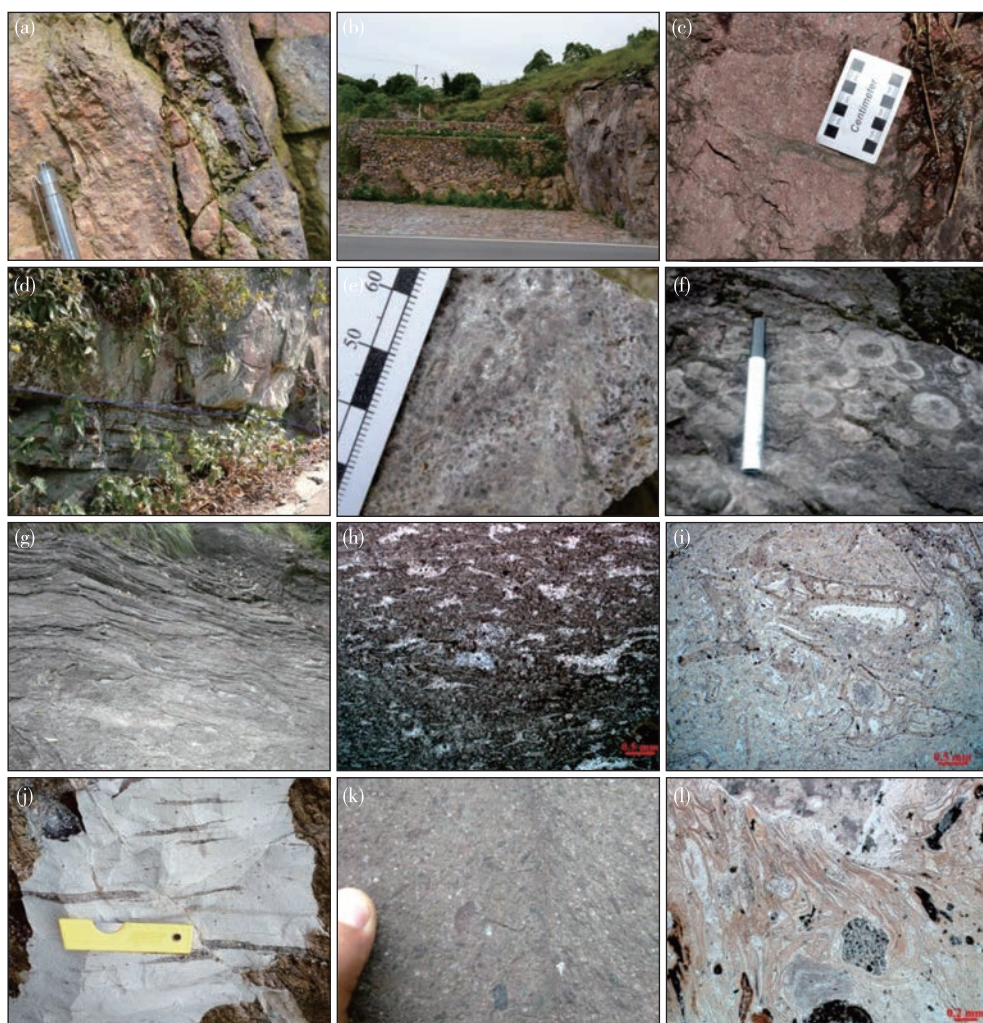
到,多呈明显负地形。望州山破火山形成后断裂主要为 NW 向,在遥感影像上大致表现为一系列平行的 NW 向剪切断层,主要有梅岭头村—北山坡村、坑底村—石塘村等,对破火山的面貌进行了一定程度的破坏。

## 2.2 岩石组合

望州山破火山内出露小平田组火山岩和中央侵入相晶洞花岗岩;根据破火山演化不同阶段形成的岩石组合、接触关系,结合同位素年代学及火山活动规律,火山活动产物由早到晚进一步划分为 4 套岩石组合。

### 2.2.1 小平田组一段( $K_1^{2x^1}$ )

小平田组一段主要为溢流相流纹岩、火山碎屑流相流纹质-英安质晶屑熔结凝灰岩(图 4(c),图 5)夹少



(a).构造透镜体;(b).正断层;(c).英安质晶屑熔结凝灰岩;(d).沉积岩夹层;(e).球粒;(f).球泡;(g).流纹构造;(h).流纹质玻屑熔结凝灰岩中的塑性玻屑(单偏光);(i).流纹质玻屑凝灰岩中的刚性玻屑(单偏光);(j).流纹质玻屑熔结凝灰岩中的平直浆屑;(k).流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩中透镜状浆屑;(l).流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩假流纹构造(单偏光)

图 4 望州山破火山典型火山岩类型照片

Fig. 4 Typical volcanic photographs of Wangzhoushan caldera

量溢流相玄武安山岩及凝灰质砂岩等沉积岩(图 4(d)),因喷发作用具有方向性,围绕古火山外部不完全对称分布,主要分布在古火山的西侧、南侧地形相对较高的地带(图 2(b)),与破火山基底的火山-沉积岩系(馆头组和朝川组)多呈断层接触,尤其是在环状断层发育的地段更是如此。英安质晶屑熔结凝灰岩在该单元中层位稳定、分布广且厚度最大(厚 150~200 m),在华岭脚—古厝一带,英安质晶屑熔结凝灰岩厚度变薄(<50 m),下部流纹岩厚度变大(50~100 m)。在破火山形成的过程中,由于南部古地形较低,古火山喷发形成的流纹岩和凝灰岩沿较低的古地

形向南流动直接覆于早期的朝川组沉积岩之上。根据岩层中的凝灰岩、沉积岩及熔岩夹层产状特征,确定该单元向破火山内部倾斜。

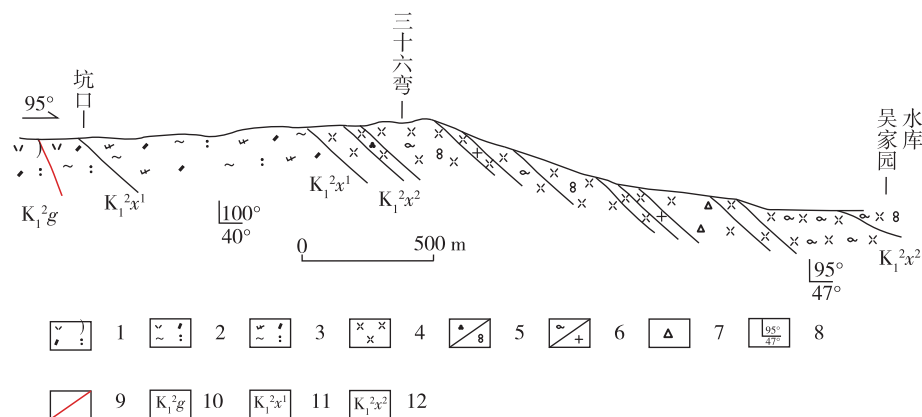
### 2.2.2 小平田组二段( $K_1^2x^2$ )

小平田组二段围绕古火山围斜内倾分布(图 2(b)),主要出露在古火山的西部、南部和北部,形成的地貌较陡立;岩性为一套多期次喷发形成的溢流相流纹岩(图 5),以发育球粒(图 4(e))、球泡(图 4(f))和流纹构造(图 4(g))为特征,偶夹凝灰质粉砂岩、火山碎屑流相流纹质晶屑熔结凝灰岩。流纹岩是多期次岩浆喷发形成的复合岩流单元,野外可见

多个岩流单元反复叠置。该段与一段之间呈整合接触,局部直接喷发不整合于古火山基底的火山-沉积岩系(馆头组和朝川组)之上。

### 2.2.3 小平田组三段( $K_1^{2x^3}$ )

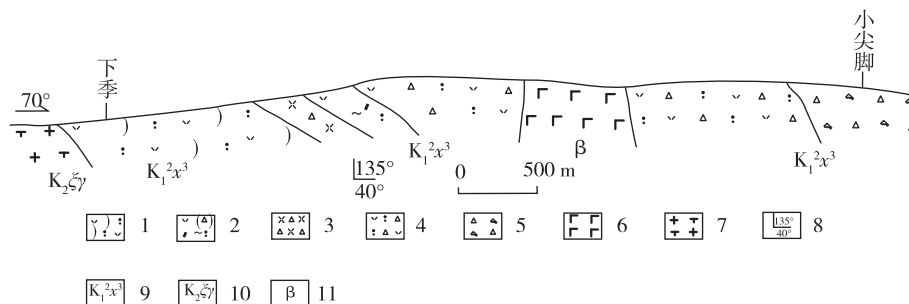
小平田组三段岩性为一套普林尼式强烈喷发形成的火山碎屑流(图 6)。



1.流纹质晶屑凝灰岩;2.流纹质晶屑熔结凝灰岩;3.英安质晶屑熔结凝灰岩;4.流纹岩;5.球粒/球泡;6.条带/斑状;7.角砾;8.产状;9.断层;10.馆头组;11.小平田组一段;12.小平田组二段

图 5 浙江省苍南县坑口—吴家园水库地质剖面图

Fig. 5 Geological section of Kengkou-Wujiayuan Reservoir in Cangnan County, Zhejiang Province



1.流纹质玻屑凝灰岩;2.流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩;3.角砾流纹岩;4.流纹质角砾凝灰岩;5.集块角砾岩;6.玄武岩;7.正长花岗岩;8.产状;9.小平田组三段;10.正长花岗岩;11.玄武岩

图 6 浙江省苍南县下山—小尖脚地质剖面图

Fig. 6 Geological section of Xiashan-Xiaojianjiao in Cangnan County, Zhejiang Province

远端为灰白色-白色流纹质玻屑弱熔结-未熔结凝灰岩(图 4(h)、图 4(i)),以发育不规则的柱状节理为特征,晶屑含量一般 $<3\%$ ,下部基本未见浆屑,向上部可见少量浆屑( $<3\%$ ),浆屑大多数细长、平直(图 4(j))。

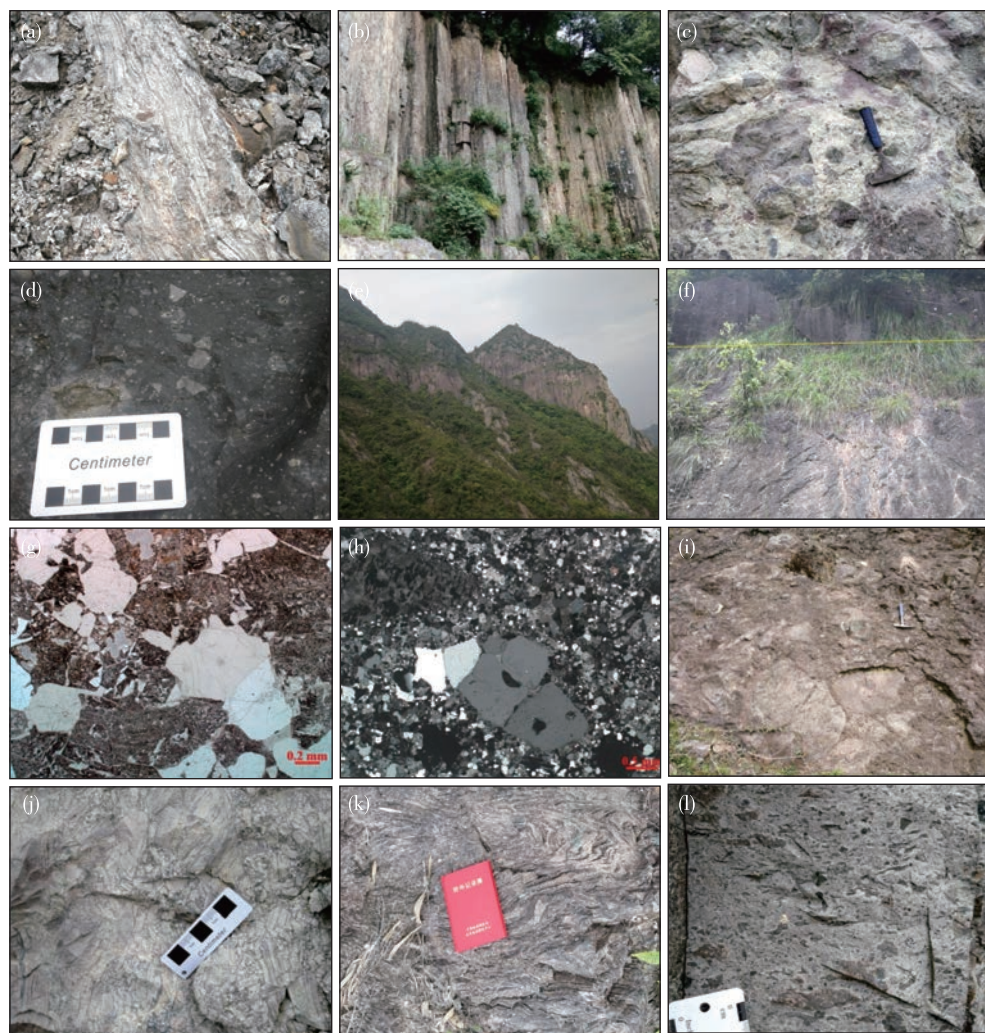
中端岩性主要为灰紫色-灰白色流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩(图 4(k)、图 4(l)),自下而上熔结程度具弱-强-弱的特征。火山碎屑含量普遍较高( $30\% \sim 50\%$ ),以角砾和晶屑为主,富含浆屑,形态以弯曲条带状、透镜状为主,局部浆屑长 $1 \sim 2$  m(图 7(a)),在大渔岙存一带还发育明显的柱状节理(图

7(b))。近端岩性主要为一套集块角砾岩-角砾凝灰岩(图 7(c)、图 7(d)),集块最大可达 $1 \sim 2$  m,集块和角砾成分复杂,以流纹岩和玄武岩为主,其余见砂岩、凝灰岩等。

远端流纹质玻屑凝灰岩在该单元中层位稳定,多数围绕古火山口西侧外围分布(图 2),在地貌上主要分布在山顶(图 7(e))。中端流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩因喷发作用具有方向性的缘故,围绕古火山分布不完全对称,主要分布在古火山东和南侧地带,尤其是南侧地带在地貌上反映十分明显,可见火山碎屑沿火山斜坡呈扇形

分布(图 2(b));南侧围斜总体呈内倾分布特征,东侧产状较缓,略具围斜外倾分布特征。近端集块角砾岩-火山角砾岩是古火山口位置的重要标志,一般多呈环状近火山口堆积,集中分布在蔡家山—仰天龙山—望州山一带,填充于古火山口内(图 2(b))。总体上看,火山碎屑具有近粗远

细的特征,最外围为粒度最细的流纹质玻屑(熔结)凝灰岩;伴随火山碎屑粒度变粗,向内岩性依次渐变为流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩和集块角砾岩-火山角砾岩。在吴家园水库西侧可见该阶段岩石呈火山喷发不整合于第二阶段流纹岩之上(图 7(f))。



(a).长达 2 m 的浆屑;(b).流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩柱状节理;(c).集块角砾岩;(d).角砾凝灰岩;(e).分布在山顶的流纹质玻屑凝灰岩;(f).上部流纹质玻屑凝灰岩与下部流纹岩接触关系;(g).正长花岗岩镜下特征(正交偏光);(h).正长花岗斑岩镜下特征(单偏光);(i).集块;(j).自碎角砾流纹岩;(k).紊乱的流纹构造;(l).流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩中的浆屑

图 7 望州山破火山典型火山地貌与岩石类型照片

Fig. 7 Typical volcanic photographs of Wangzhoushan caldera

#### 2.2.4 中央侵入相晶洞花岗岩

晶洞花岗岩为望州山破火山复活阶段的产物,岩性为正长花岗岩—正长花岗斑岩(图 7(g)、图 7(h)),均发育晶洞构造,晶洞体积占比约 10%,大小不一,一般 0.3~1.5 cm,形态为不规则状,晶洞内

充填有晶形完好的石英晶簇。正长花岗岩出露于破火山中部藻溪镇一带,肉红色,中-细粒花岗结构,粒径多数为 0.3~4 mm,主要由钾长石(55%)、石英(25%~30%)、斜长石(10%~15%)和少量黑云母组成,偶见钠铁闪石。其中钾长石呈自形板柱

状、半自形短柱状,可见卡式双晶;斜长石呈较小的板柱状,聚片双晶发育;石英为它形;基质中多见石英和钾长石呈文象交生构成文象结构。正长花岗岩出露于破火山中部藻溪镇和破火山边部大尖山一带,肉红色,斑状结构,岩石发育明显的晶洞构造,斑晶主要由钾长石(约 20%)和少量石英、黑云母组成,粒径为 2~7 mm,基质含量约 80%,主要由更细小的石英、钾长石和黑云母组成。

### 2.3 主喷发口特征

望州山破火山的主喷发口位于苍南县藻溪镇蔡家山—仰天龙山—望州山一带,出露岩性为古火山口喷发及崩塌堆积的集块角砾岩-含集块角砾岩以及近火山口堆积的角砾凝灰岩-火山角砾岩。从现今剥蚀残留的地貌上来看,集块角砾岩-火山角砾岩出露的地方均位于海拔较高处,多为近等轴状、穹隆状山岳,集块最大可达 1~2 m(图 7(i))。另外,古火山口外围火山-沉积岩均围绕其呈弧状、半环状围斜内倾分布(图 2(b))。火山碎屑粒度总体上具有以古火山口为中心近粗远细的特征。虽然整个破火山被后期 NW 向断层改造明显,但古火山口的总体面貌、火山-沉积岩层分布特征依然十分明显。

### 2.4 火山岩岩性岩相特征

通过详细的野外地质调查,望州山存在 5 种火山岩相:溢流相、爆发崩塌相、火山碎屑流相(包含灰云亚相)、中央侵入相和喷发-沉积相。灰云亚相-火山碎屑流(亚)相-爆发崩塌相均为普林尼式火山喷发产物,溢流相形成于火山的喷溢或溢流作用。

#### 2.4.1 溢流相

溢流相在研究区藻溪镇大面积分布,岩性以流纹岩为主,局部夹少量玄武岩-安山岩。流纹岩原生构造普遍较清楚,以发育球粒、球泡和流纹构造为特征。研究区流纹岩总体厚度较大(>300 m)、分布广,多为近于同时喷出的熔岩流依次堆叠的结果,可划分为多个岩流单元。野外可见多个岩流单元反复叠置,单个岩流单元的顶(上)部、中部、底(下)部由于冷却条件的差异,岩石构造、结构及相关物理性质明显不同:底部多见同成分的自碎角砾(图 7(j)),普遍发育球泡(图 4(f)),球泡之间细密的流纹构造十分清晰,一般无斑或少斑;中部球泡含量急剧减少,以发育清晰的流纹条带为特征,流

纹条带局部紊乱(图 7(k))、总体平稳,一般无斑或少斑;顶部流纹构造少见或偶见,以块状为特征,一般含有少量(3%~5%)的石英和钾长石斑晶,有时可见球粒构造(图 4(e))。

#### 2.4.2 灰云亚相

灰云亚相主要呈半环状-弧状围绕火山喷发中心分布于火山外围,主要岩石类型为流纹质流纹质玻屑熔结-未熔结凝灰岩(图 4(h)、图 4(i)),碎屑物主要由玻屑和火山灰组成,一般新鲜面的浆屑不可见,风化面上可见平直的浆屑条带,浆屑形态与典型火山碎屑流亚相的浆屑差别明显,基本上均为平直的浆屑(图 4(j)),未见弯曲,是在火山活动过程中少量的浆屑与火山灰降落后经后期埋藏作用形成的平直浆屑。

#### 2.4.3 爆发崩塌相

爆发崩塌相岩性主要为一套集块角砾岩-角砾凝灰岩(图 7(c)、图 7(d)),一般多呈环状近古火山口堆积,集中分布在蔡家山—仰天龙山—望州山一带,填充于古火山口附近。总体来看,这套爆发崩塌相岩石是寻找古火山口的重要标志,在显微镜下也具熔结结构,从而表明这套岩石的形成是与火山碎屑流亚相熔结凝灰岩、灰云亚相凝灰岩在同一火山作用下形成的,由于距离火山口的远近不同以及搬运方式的差异而导致岩性差别很大。

#### 2.4.4 火山碎屑流相

火山碎屑流相堆积是火山强烈爆发、喷发柱崩塌的产物,是望州山破火山主要的岩石类型。它们多出现于火山斜坡或火山通道周围,也常堆积于破火山内。熔结现象是火山碎屑流相岩石的主要特征,但在由碎屑流堆积构成的“冷却单元”的底部和顶部,往往熔结较弱或未熔结;与此相应的特征是一个冷却单元内,通常底部(及下部)角砾含量较多,岩屑可见,晶屑较少,熔结较弱;往上则角砾减少,晶屑含量增加,熔结增强;上部玻屑、浮岩屑增加,相应地晶屑减少,熔结程度降低。据此,可识别缺乏其他相岩石夹层的火山碎屑流堆积中的冷却单元。

研究区也有不少火山碎屑流相堆积,主要见于小平田组一段和三段,尤其是以三段最为明显,其典型的标志是浆屑特别发育,浆屑形态以弯曲条带状、透镜状为主(图 7(l)),有些浆屑长达 1~2 m(图 7(a));岩性主要为流纹质晶屑熔结凝灰岩、流纹质含角砾(晶玻屑、晶屑)熔结凝灰岩、英安质(含角

砾)晶屑(强)熔结凝灰岩等。

#### 2.4.5 喷发-沉积相

喷发-沉积相是由火山碎屑与陆源碎屑在水体中混杂堆积形成的,火山碎屑可源于不同类型的火山喷发,地层结构介于火山型与沉积型之间,称为喷发沉积型;主要岩石类型为沉集块角砾岩、沉角砾岩、沉凝灰岩以及凝灰质沉积岩。若水体较浅,火山物质迅速大量补给,则可形成具层状构造的层凝灰岩。根据火山碎屑粒度、含量及堆积环境分析,可分为破火山湖盆喷发沉积相和火口湖盆喷发沉积相两种主要类型。望州山破火山内喷发沉积相岩石主要为破火山湖盆沉积的沉凝灰岩、凝灰质砂岩等细碎屑沉积岩(图 4(d)),多呈厚度不大(多 $<20\text{ m}$ )的夹层,出露于三条溪、吴家园水库及大岙村一带,是大规模火山喷发间歇期的产物。

#### 2.4.6 中央侵入相

中央侵入相往往是复活破火山最晚期活动产物,早期大规模的火山喷发使得岩浆房中的挥发份大量逸散,导致晚期岩浆无法喷出地表,只能沿早期的主喷发通道等上侵形成侵入岩。研究区中央侵入相为正长花岗岩及正长花岗斑岩(图 7(g)、图 7(h))主要出露于藻溪镇和大渔岙村一带,与围岩呈侵入接触。

### 3 破火山形成演化阶段

通过野外对断层系统、岩石组合及岩性岩相特征、主喷发口特征的系统调查显示,叠置于矾山火山构造洼地之上的望州山古火山是一座以流纹质喷发为主的大型复活破火山,其北部被大面积的第四系覆盖,总体面貌被晚期断层破坏。但围绕破火山的环状或弧状断层十分明显,尤其是其西侧和南侧溪心村—梯脚—三条溪一带多条弧状断裂集中分布,构成火山机构的南侧及西侧边界。破火山东侧边界以沿早期环状断裂侵入的正长花岗斑岩为界。

野外系统的产状测量及不同岩石的产出特征、空间展布调查证实,火山机构内部无论是沉积岩还是火山岩多围绕火山通道呈现出环状或弧状分布特征(图 2(b)),例如,破火山西侧溪心村—梯脚一带岩层总体向 E 和 SE 倾,倾角  $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ;南侧矾山一带岩层总体向 NE—NW 围绕火山机构内倾,倾角陡缓不一;东侧岩层倾向不一,但其外围早期的

英安质晶屑熔结凝灰岩总体向 SW 和 W 倾的特征也十分明显。北侧岩层总体倾角较缓,大多 $<20^{\circ}$ 。

总体来看,早期馆头组和朝川组构成破火山的基底,在火山机构外围分布。小平田组火山岩平面上总体呈环状展布,其中一段、二段火山碎屑岩-流纹岩构成火山机构的外带。三段火山碎屑流相流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩-流纹质晶屑熔结凝灰岩围绕主喷发口构成火山机构内带。灰云亚相流纹质玻屑熔结凝灰岩多分布在火山机构西部,东部和南部未见,可能与当时火山喷发时风向或后期的剥蚀有关,其粒度最细,随空气飘落最远。而粒度粗、体积大的碎屑集中在主喷发口分布。早期排空的岩浆房在晚期重新复活,岩浆沿火山通道上升侵位,在藻溪镇、大尖山一带形成中央侵入相正长花岗(斑)岩和侵出相流纹斑岩等潜火山岩类。因此,根据组成望州山破火山的各类岩石岩性岩相特征、时空分布格局、接触关系,推演望州山破火山演化历史主要经历了 5 个阶段。

#### 3.1 第一阶段:初始断陷夹小规模喷发

大约在 110 Ma 的早白垩世晚期,望州山破火山仍隶属于矾山火山构造洼地的一部分,沿边界发生断陷,在望州山破火山范围内沉积了一套数百米厚的沉积岩(朝川组)。北部因断陷相对较深,地表多无沉积岩行迹可寻。该沉积岩中夹少量玄武岩、凝灰岩,表明在初始断陷的晚期望州山破火山已开始有少量的火山活动(图 8(a))。

#### 3.2 第二阶段:普林尼式喷发

在矾山断陷盆地形成的基础上,随着区域性断裂活动的加剧,岩浆活动趋于强烈,岩浆在地下一定深度的岩浆房经过分异、演化之后,经历一定程度的小规模溢流。之后是大规模喷发,喷发形式主要为中心式喷发,喷发类型主要是普林尼式,来自低喷发柱的炽热的火山碎屑流堆积形成一套富含浆屑的英安质熔结凝灰岩(图 8(b))。该阶段主要形成小平田组一段( $K_1^{x1}$ )岩石组合。熔结凝灰岩的喷发往往伴随着破火山的塌陷,但该阶段破火山的坍塌迹象多被更晚的破火山喷发和塌陷所掩盖。

#### 3.3 第三阶段:溢流式喷发

经过大规模的爆发作用之后,岩浆房内部压力相对减小、火山作用方式以溢流为主,大量流纹质岩浆自火山口喷溢出来,形成一个延伸很广、厚度巨大的流纹岩熔岩盾(图 8(c))。该阶段主要形成

小平田组二段( $K_1^2x^2$ )岩石组合。

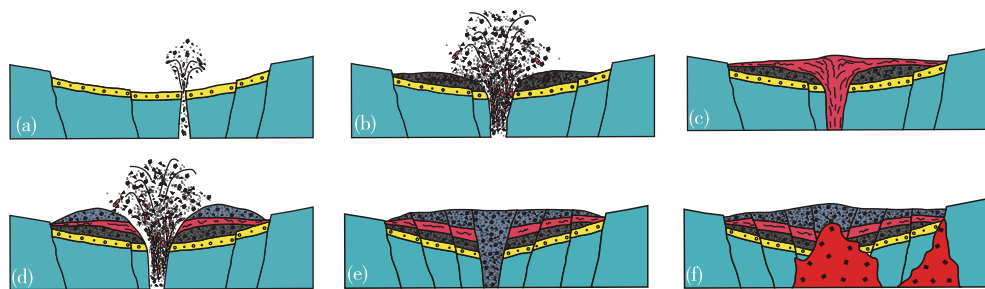
### 3.4 第四阶段:大规模普林尼式喷发和破火山塌陷

沿深部通道继续上侵的岩浆在排空的岩浆房内再度聚集和分异、演化及能量聚集之后,继续沿早期喷发的古火山通道或断裂系统向外大规模喷发。该阶段喷发以中心式普林尼式喷发为主。来自高喷发柱的火山碎屑密度流上部细小碎屑搬运较远,在远端堆积形成一套灰云亚相流纹质玻屑(熔结)凝灰岩;中部火山碎屑沿火山斜坡搬运,在主喷发口周边堆积一套火山碎屑流亚相熔结凝灰岩,以富含浆屑、晶屑和角砾为特征;在主喷发口附近堆积形成集块角砾岩-角砾凝灰岩(图 8(d))。该阶段主要形成小平田组三段( $K_1^2x^3$ )组合。以往研究表明,大型(直径 $>5$  km)流纹质破火山,主要是由于大规模的酸性岩浆的喷发导致岩浆房的排空,

进而引起上覆顶板沿着环状断层系统的塌陷形成的<sup>[29,32]</sup>。就望州山破火山而言,小平田组三段火山碎屑流凝灰岩的喷发导致岩浆房排空,致使破火山底板(Caldera floor),小平田组一段、二段及更早的朝川组和馆头组地层)超压沿着破火山环状系统塌陷,形成破火山(图 8(e))。

### 3.5 第五阶段:破火山复活

破火山复活阶段。早期大规模的猛烈爆发使得岩浆房大部分排空。于是,失去大量挥发分而使黏度大增的岩浆已经无法喷出地表,只能沿着已打开的火山通道作整体侵(入)出,在火山通道上方生成侵入岩穹,或呈脉状充填于早期喷发形成的火山岩及基底岩系的裂隙中,形成中央侵入相晶洞正长花岗岩、正长花岗斑岩以及侵出相流纹斑岩等(图 8(f))。



(a).初始断陷夹小规模喷发;(b).普林尼式喷发;(c).溢流式喷发;(d)、(e).大规模普林尼式喷发和破火山塌陷;(f).破火山复活

图 8 浙江省苍南县望州山破火山形成演化示意图

Fig. 8 Evolution model of Wangzhoushan caldera in Cangnan County, Zhejiang Province

## 4 结论

(1)叠置于矾山火山构造洼地之上的望州山古火山是一座以流纹质喷发为主的大型复活破火山,以环状展布且向核部由老变新、产状围斜内倾的火山-沉积岩系,密集成群分布的环状和放射状断裂,以及晚期中央侵入相岩穹为特征。

(2)望州山破火山的地层为小平田组,可划分为 3 个岩性段,其中以二段流纹岩和三段火山碎屑岩最为典型。流纹岩具多个岩流单元反复叠置的特征。普林尼式喷发形成火山碎屑岩,远端为流纹质玻屑弱熔结-未熔结凝灰岩,中端主要为流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩,近端为一套集块角砾岩-角砾凝灰岩,构成火山通道,总体上具有近粗远细的

特征。

(3)望州山破火山演化历史先后经历初始断陷夹小规模喷发、普林尼式喷发、溢流式喷发、大规模普林尼式喷发和破火山塌陷以及晚期复活 5 个阶段。

**致谢:** 本文是集体劳动的结晶。参加野外地质调查工作的还有中国地质调查局南京地质调查中心朱清波高级工程师、洪文涛博士、陈世忠研究员、曹明轩博士,福建省地质调查研究院王峰高级工程师以及南通大学舒徐洁副教授;野外地质调查过程中得到中国地质调查局南京地质调查中心徐敏成教授级高工、骆学全教授级高工、蒋仁高级工程师的指导;在成文过程中与中国地质调查局南京地质

调查中心王存智高级工程师进行了非常有意义的交流,在此一并致以衷心感谢!

## 参考文献

- [1] MILLER C F, WARK D A. Supervolcanoes and their explosive supereruptions [J]. *Elements*, 2008, 4: 11-15.
- [2] EDMONDS M, WALLACE P J. Volatiles and exsolved vapor in volcanic systems [J]. *Elements*, 2017, 13: 29-34.
- [3] FISCHER T P, ARELLANO S, CARN S, et al. The emissions of CO<sub>2</sub> and other volatiles from the world's subaerial volcanoes [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 18716.
- [4] HINCHEY A M. Lithofacies architecture and paleoenvironment of a Paleoproterozoic volcano-sedimentary sequence: Insight into rift-related volcanism during supercontinent assembly [J]. *Pecambrian Research*, 2020, 367: 106443.
- [5] ZHANG H, ZHANG F, CHEN J, et al. Felsic volcanism as a factor driving the end-Permian mass extinction[J]. *Science Advances*, 2021, 7: eabh1390.
- [6] 沈树忠, 张华. 什么引起五次生物大灭绝? [J]. *科学通报*. 2017, 62(11):1119-1135.  
SHEN S Z, ZHANG H. What caused the five mass extinctions? [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62: 1119-113.
- [7] 刘若新. 中国的活火山[M]. 北京:地震出版社, 2000: 1-114.  
LIU R X. Active volcanoes in China[M]. Beijing: Seismological Press, 2000:1-114.
- [8] 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.
- [9] 曹明轩, 褚平利, 段政, 等. 华南中生代火山活动时空演化及其问题探讨[J]. *地质论评*, 2010, 66(4): 795-812.  
CAO M X, CHU P L, DUAN Z, et al. Spatial-temporal evolution and controversy of the Mesozoic volcanism in South China [J]. *Geological Review*, 2010, 66(4):795-812.
- [10] 谢家莹, 陶奎元, 冯宗帜, 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, 1996:1-277.  
XIE J Y, TAO K Y, FENG Z Z, et al. Mesozoic volcanic geology and volcano-intrusive complexes of Southeast China continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-277.
- [11] 陆志刚, 陶奎元, 谢家莹, 等. 中国东南大陆火山地质及矿产[M]. 北京:地质出版社, 1997:1-431.  
LU Z G, TAO K Y, XIE J Y, et al. Volcanic geology and mineral resources of Southeast China continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-431.
- [12] 陶奎元, 高天钧, 陆志刚, 等. 东南沿海火山岩基底构造及火山-侵入作用与成矿关系[M]. 北京:地质出版社, 1998:1-371.  
TAO K Y, GAO T J, LU Z G, et al. Basement tectonics of volcanic rock and volcano-intrusion related to mineralization of coastal area of Southeast China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:1-371.
- [13] 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*, 1984, 89: 8801-8841.
- [14] MEDLIN C, JOWITT S, CAS R, et al. Petrogenesis of the A-type, Mesoproterozoic intra-caldera rheomorphic Kathleen ignimbrite and comagmatic Rowland suite intrusions, West Musgrave Province, Central Australia: Products of extreme fractional crystallization in a failed rift setting[J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56: 493-525.
- [15] DEERING C D, KELLER B, SCHOENE B, et al. Zircon record of the plutonic-volcanic connection and protracted rhyolite melt evolution[J]. *Geology*, 2016, 44: 267-270.
- [16] 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.
- [17] 王德滋, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化[M]. 北京:科学出版社, 2002: 1-295.  
WANG D Z, ZHOU X M, SHU L S, et al. The petrogenesis of the Late Mesozoic granitic volcanic-plutonic complex and crustal evolution in SE China[M]. Beijing: Science Press, 2002:1-295.
- [18] 陶奎元, 薛怀民. 中国东南沿海与西南日本内带中生

- 代火山活动时代、旋回与迁移问题的讨论[J]. 南京地质矿产研究所所刊, 1988, 9(1): 1-13.
- TAO K Y, XUE H M. Comparative study on the ages and cyclicities between the Mesozoic volcanics of the coastal margin of Southeast China and that of the inner zone of Southwest Japan[J]. Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci., 1988, 9(1): 1-13.
- [19] 李坤英, 沈加林, 王小平. 中国浙闽赣地区中生代陆相火山岩同位素年代学[J]. 地层学杂志, 1989, 13(1): 1-13.
- LI K Y, SHEN J L, WANG X P. Isotopic chronology of Mesozoic subaerial volcanic rocks in Zhejiang-Fujian-Jiangxi area, China[J]. Journal of Stratigraphy, 1989, 13(1): 1-13.
- [20] 尹家衡, 黄光昭. 中国东南沿海中、新生代火山旋回[J]. 火山地质与矿产, 1997, 18(3): 167-190.
- YIN J H, HUANG G Z. Mesozoic-Cenozoic Volcanic cycles of Southeast Coast of China[J]. Volcanology & Mineral Resources, 1997, 18(3): 167-190.
- [21] 余明刚, 洪文涛, 杨祝良, 等. 东南沿海燕山期火山活动旋回划分及其成矿规律[J]. 地质通报, 2021, 40(6): 845-863.
- YU M G, HONG W T, YANG Z L, et al. Classification of Yanshanian volcanic cycle and the related mineralization in the coast area of southeastern China[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(6): 845-863.
- [22] XING G F, LI J Q, DUAN Z, et al. Mesozoic-Cenozoic Volcanic Cycle and Volcanic Reservoirs in East China[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(4): 742-765.
- [23] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-387.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. Regional Geology of Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1-387.
- [24] 浙江省地质矿产局. 浙江省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 1-236.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. Stratigraphy (Lithostratic) of Zhejiang Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 1-236.
- [25] 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.
- 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.
- [26] 尹家衡, 王占宇, 陶奎元, 等. 桐庐火山-构造洼地基本特征及演化[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 1985, 6(4): 1-17.
- YIN J H, WANG Z Y, TAO K Y, et al. Tonglu Volcano-tectonic depression: basic features and its evolution[J]. Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci., 1985, 6(4): 1-17.
- [27] LIPMAN P W. The Roots of Ash Flow Calderas in Western North America: Windows into the Tops of Granitic Batholiths[M]. American Geophysical Union (AGU), 2014.
- [28] ROCHE O, DRUITT T H, MERLE O. Experimental study of caldera formation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000 (105B): 395-416.
- [29] COLE J W, MILNER D M, SPINKS K D. Calderas and caldera structures: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2005, 69(1): 1-26.
- [30] LIPMAN P W. Geologic map of the Bonanza caldera area, northeastern San Juan Mountains, Colorado[J]. US Geological Survey, 2020.
- [31] 浙江省区域地质测量大队. 1:200 000 平阳幅区域地质调查报告[R]. 杭州: 浙江省地质局, 1976: 1-293.
- Regional Geological Survey Brigade of Zhejiang Province. 1:200 000 Report of Pingyang regional geological survey [R]. Hangzhou: Zhejiang Geology Bureau, 1976: 1-293.
- [32] HARALDUR S, BRUCE H, STEVE M, et al. The encyclopedia of volcanoes[M]. Elsevier, 2015.

## Geologic features and evolution of Wangzhoushan caldera in Cangnan County, Zhejiang Province

CHU Pingli<sup>1,2,3</sup>, JIN Guodong<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, CHEN Rong<sup>2</sup>, FAN Feipeng<sup>2</sup>, DUAN Zheng<sup>1,2</sup>,  
YU Minggang<sup>2</sup>, ZHAO Xilin<sup>2,3</sup>, LI Longming<sup>3</sup>, HE Zhenyu<sup>4</sup>

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

3. *Department of Resources and Environment Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*

4. *School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)*

**Abstract:** Compared with the well-preserved young volcanoes, the ancient volcanoes that have experienced long denudation and late structural transformation can directly expose the material composition of different forming time and depth, which is the ideal object for the anatomy of volcanic edifice. It plays an important role for understanding the process of volcanic eruption and the evolution of shallow magma system, and has practical significance for the monitoring and disaster assessment of active volcanoes. Based on regional geological survey and comprehensive research of Wangzhoushan ancient volcano in Cangnan, Zhejiang Province, we identify that this ancient volcano is a typical resurgent caldera according to its lithology and lithofacies plane which show annular distribution and become younger toward the core with the occurrence of inward-dipping volcano-sedimentary strata, typical ring and radial faults, and later resurgent dome. The evolution of Wangzhoushan caldera consists of six stages: initial subsidence accompanied with small eruptions, minor Plinian eruption, effusive eruption, major Plinian eruption, caldera collapse and resurgence.

**Key words:** Wangzhoushan resurgent caldera; volcanic evolution; volcanic lithofacies; volcanic faults; Cangnan County in Zhejiang Province