热烈庆祝中国地质学会
成立100周年
1922～2022
www.
geojournals.cn/georev

破火山口研究述评

丁 毅[1,2,3)],孙继明[3)],吴云霞[4)]

1) 河北地质大学交叉科学学院,石家庄, 050031;

2) 河北地质大学地质调查研究院,石家庄,050022;

3)河北地质大学非洲资源与环境研究中心, 石家庄,050022;4)河北地质大学地球科学学院,石家庄,050031

内容提要: 破火山研究是火山学研究的一个重要分支,也是国内外学者持续关注的热点,这是因为形成破火山口的岩浆演化时间长,多是大型多金属、贵金属、铀矿等矿床的聚集地,大型破火山口的形成在地球生物进化史中影响很大。笔者等对破火山口的概念、容易混淆使用的分类和名词、世界知名破火山口及其形成理论研究、大型破火山口的研究认识与矿床形成的关系、中国破火山研究和今后努力的方向进行了一个总结。实际上在科学研究的阶梯上搭了一个向上继续向上的阶。期待学者在这方面又高水平的研究,为国家战略资源保障和为世界破火山口研究做出中国贡献。

关键词:破火山口;矿产

破火山口研究是国内外学者持续关注的热点,因为:① 大型破火山口的形成地质年代的研究有助于理解地球生物演化过程;② 监视和防范大型破火山口的复活避免对人类的伤害;③ 有助于理解板块构造理论与破火山口的成因关系;④ 破火山口区域范围常有铀、多金属、贵金属等大型矿产。这些重要意义造就了破火山口研究已经成为了火山学一个重要的分支,这个重要的分支在全球的研究进展的述评十分必要,特别是每经过三至五年,一个学科分支研究需要总结,将全球在这个学科分支上的研究成果进行归纳、集合、评论,这就等于在科研的梯子上不断向上搭阶,这是提升一个国家整体科研水平的一个手段,今后的科研就是踩在一层一层的梯子上的"阶"继续向上攀登。笔者等正是出于这个目的,对全球破火山口方面的研究作个述评。

1 破火山口的概念

火山口的大小决定了我们称其为普通的火山口还是破火山口。Lipman (1997) 认为与火山活动有关、直径大于 1 km、具有陡峭的火山口内壁和相对平坦的底部。在形成特点上,破火山口是由于火山爆发形成初始火山建造之后,火山底板下的岩浆房内的岩浆经过一定的地质时期的演化,火山活动复活再次喷发或挤出而导致岩浆房中岩浆的体量被掏空,而火山口底板失去支撑而沉降,而形成了更大的火山口(Lipman, 1997; Geshi et al., 2002; Cole et al., 2005; Michon et al., 2011),因此,破火山口具有演化时间长、多次爆发的特点。还有另外一种情况就是当岩浆爆发碎屑喷出地表后没有继续喷发,则半熔融状态的火山底板岩石失去支撑,从而岩浆房的顶部塌陷形成较大规模的凹陷(subsidence)。岩浆以侵入或喷出都使得从地下深部上到岩浆房中的岩浆体量大减而导致塌陷(Branney and Acocell, 2015)。地质调查、数值计算(Holohan et al., 2015)和实验研究(Acocell,2007)都证实了形成破火山口的这一多次喷发而沉降理论。整个破火山口的形成过程经历了:①岩浆沿火山管道系统的侵入和喷发阶段,即在破火山口形成之前的火山喷发或岩浆侵入活动;②部分或全部相关的火山口崩塌导致管道系统的破坏;③随机分散在火山口内或沿区域构造趋势分布的岩浆侵入形成在破火山口中心部分隆起,这种隆起也可能是由岩床复合体侵入引起的;④热液矿化,这可能发生在火山口的整个形成过程,但在最后的这一过程呈主导活动(Cole et al., 2005)。

注: 本文为河北省教育局 2021 引智项目(编号: 360208)的成果。

收稿日期:2022-06-04;改回日期:2022-07-07;网络首发:2022-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.07.095

作者简介: 丁毅,男,1957 年生,教授,主要从事火山和火山岩、火山地貌、金伯利岩、陨石坑等研究; Email: chinakimberlite@126.com, vwsource@hotmail.com。

2 破火山口的分类

2.1 根据地貌形态分类

有 3 种类型:与层火山(stratovolcanoes)崩塌有关的火山口湖型破火山口(crater-lake type),与盾状火山(shield volcanoes)顶部坍塌有关的玄武质型破火山口(basaltic calderas),大型火山形成后又经历多点喷发且崩塌的复活型破火山口(resurgent calderas)。为避免汉语音译造成不必要的混淆,例如:仅 Vulcanian(式)火山就有伏尔加诺(式)、瓦尔加诺(式)、乌尔加诺(式)火山,笔者等提及的火山或破火山口的名称采用原文。

火山口湖型破火山口是在 Plinian 式火山喷发的主要阶段之后,火山口下面的岩浆房被掏空失去支撑,导致之前形成的火山口塌陷,周围形成较厚的熔结凝灰岩,这是火山口湖型破火山口的标志,但并非是识别这种破火山口的必要条件。最典型的也是根据这一火山口的名字命名的就是美国俄勒冈州的火山口湖(Crater Lake)。

火山碎屑密度流(PDC, Pyroclastic Density Currents)是一种沉积性的流体,Plinian 火山爆发碎屑柱体倾斜在火山侧面,碎屑物和高温的气体混合物受重力控制形成片流层(Acocella, 2021),碎屑物包括岩浆源碎屑和由流体流动时裹挟的地面原有的碎屑(Brown and Andrews, 2015)。大小不同的火山喷发都可以形成 PDC(Acocella, 2021)。在 Plinian 火山爆发和亚 Plinian 火山爆发时,常形成浮石和火山灰为主的沉积物,称之为 ignimbrite [教科书译为熔结凝灰岩;魏海泉等曾译为伊格尼姆岩; 魏海泉等(2022)译为“浮岩流”,以强调其喷发柱塌陷高速向外泛滥的富浮岩质火山碎屑流成因; 丁毅(2022)强调岩浆的炽热,认为译为“熔接凝灰岩”,更能对应于英文的 welding]。包含岩浆上侵—火山爆发整个过程的源岩浆碎屑,体量小的熔结凝灰岩的成分变化为玄武质—安山质,体量大的熔结凝灰岩的成分为英安质—流纹质(Acocella, 2021)。熔结凝灰岩含有岩屑、晶屑,塑变玻屑、浆屑等。塑性碎屑常形成压扁拉长(如形成:纺锤体),绕过刚性碎屑形成平行排列的火山碎屑结构显示出可塑性和延展性,手掌大小的浮石碎片被炽热基质紧密包裹中,这种流动性又显得非常黏稠,形成焊接角砾碎屑流,其中的浮石碎块和岩屑大小从火山弹状至砾状都有,周围是更细的玻璃、晶体和岩屑的基质,经过流动变形、压实、熔结和沉积后形成 (Camp, 2022)。

玄武质型破火山口,许多盾型火山的顶部地区都有破火山口,如夏威夷的 Mokuaweoweo 破火山口和 Kilauea 破火山口,埃塞俄比亚的 Erta Al caldera 火山口,法属 Reunion 岛的 Piton del la Fournaise 火山口,以及 Galapagos 群岛 Fernandina 盾状火山口。地球上大多数玄武质盾状火山喷口的直径为 1~5 km。然而,在火星上观测到的盾形火山巨大,如:Olympus Mons 破火山口,直径超过 60 km。

复活型破火山口,火山活动经过地质年代较长的时期复活再度喷发和侵入,形成多点喷发且复活崩塌的破火山口,是地球上规模较大的破火山口。通常是地下岩浆房较大、演化时间长、多次喷发所形成的直径在 15 到 100 km 之间的火山口湖,这些破火山口与火山口湖型破火山的形成过程相似,区别在于直径超大、中间有直径约 1 km 的隆起(图 2)。这些复活的火山口中地质年代最年轻的是印度尼西亚苏门答腊岛 Toba 火山口,是 74 ka 前形成的。在美国有 3 个不到 1.5 Ma 前的复活火山口:美国新墨西哥州的 Valles 火山口、美国加利福尼亚州的 Long Valley 火山口和美国怀俄明州的 Yellowstone 火山口。复活崩塌的破火山口底部通常有流纹岩流、玄武岩流呈层状铺垫,也有岩浆侵入岩穹出现。火山口的形成始于地壳隆起,伴随着大量富含气体的流纹岩浆溢出,它们沿环形裂缝从岩浆通道向外溢流到地表,同时各种气体随同岩浆一起逃逸。岩浆减压导致大规模的气泡的形成和火山灰向高层大气中的爆炸性喷发。随着喷发减弱,火山碎屑流开始沿环形裂缝溢出, 岩浆室中的岩浆被耗尽的同时其地壳顶部开始坍塌。火山口底部的复活阶段大约需要 1 ~100 ka 才能完成。这一时期的抬升可能是由岩浆房坍塌顶板下剩余岩浆的压缩或新岩浆进入岩浆房控制的 (Goff et al., 1994)。

2.2 根据成分分类

这种分类只有描述意义而不具成因意义,根据喷发物的主要成分(玄武岩、过碱性岩、安山岩—英安岩、流纹岩)对火山口进行描述,并给出了各大类的特征。喷发类型可能是喷溢式或爆炸式,前者主要是玄武岩流溢出,后者主要发生在安山岩—英安岩、流纹岩和过碱性岩浆活动。

2.3 形状描述性分类

火山口是所有火山环境中的重要特征,通常是地热活动和矿化的场所。然而,在过去 30 a 中,综合分析破火山的剥蚀研究、火山口内部的地球物理分析、破火山形成的模拟模型的建立,对破火山进行

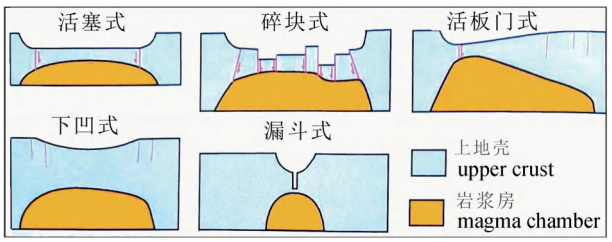


图 1 五种描述破火山口的几何类型
(基于 Acocella, 2021)

Fig. 1 The five established geometric caldera types (based on Acocella, 2021)

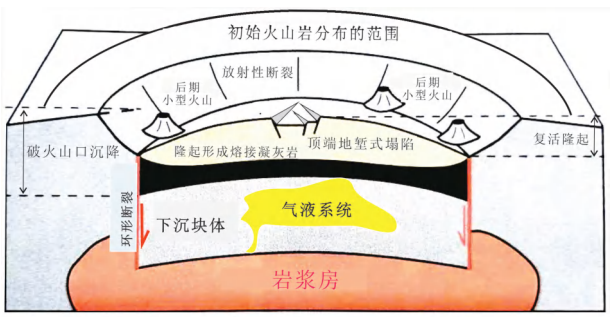


图 2 破火山口形态、构造、岩浆活动特征示意图
[根据 Cole et al. (2005)和 Acocella(2021) 修改]

Fig. 2 Schematic diagram of caldera morphology, structure and magmatic features (modified from Cole et al., 2005 and Acocella, 2021)

了完全的三维研究。随着越来越多地使用火山口的数据,它们的个性变得明显。对破火山口的塌陷类型(图 1)有成熟的五种名词来描述:活塞式(piston),边部有环状构造;碎块式(piecemeal),破火山口内断裂发育,形成内部起伏不同的块体;活板门式(trapdoor),不均匀对称,一端构造发育另一端呈挠曲下凹;下凹式(downsag),向内凹陷,但断裂不发育;漏斗式(funnel),下沉垂直且比较窄(Walker, 1984; Lipman, 1997; Cole et al., 2005; Acocella, 2021)。

地面变形包括沉降或塌陷(破火山口的基本特征)、隆起或膨胀、复活引起的破裂。塌陷是一个描述破火山口形成过程中最常用的词汇。然而,在各种破火山口的形成中可能发生在先前存在的区域构造的基础上,例如:区域断层或火山口形成间产生的环形断裂,塌陷区域的形状将受岩浆房的深度、大小和形状的影响。破火山口的最终形态将取决于火山口底部的破裂方式、崩塌是在一个事件还是多个事件中发生的(垂直运动在整个喷发序列中是间歇的还是连续的)、中心块体是在一个或多个崩塌中心均匀或无序地沉降等(图 2,图 3)。

3　世界一些破火山口特征和研究

3.1　俄勒冈州的火山口湖破火山口

该火山口壁高出湖面 600 m(图 4a),是北美最深的淡水湖。这一巨大的凹陷是大约 6.85 ka 前 Mazama 层火山猛烈喷发和坍塌形成的,这次大规模

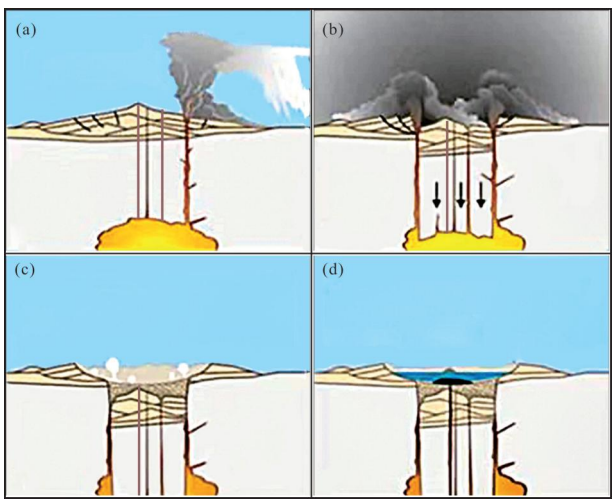


图 3 美国俄亥俄州的 Crater lake 火山口形成示意图(基于 United States Geological Survey, 略有修改):(a) 火山形成后,在侧面又有喷发,酸雨对地区气候有很大影响,此时岩浆房没有大规模持续向上运移岩浆;(b) 岩浆复活阶段,大规模和多点式喷发,掏空岩浆房,造成初始火山崩塌,形成很多的放射和环状断裂;(c) 沿着断裂初始火山形成前后的断裂、塌陷过程形成的放射性和环状断裂,晚期矿化液体充填;(d) 最后有中心或侧翼岩浆侵入,形成小岩株穹窿或矿化穹窿

Fig. 3 Schematic diagram of the formation process of the Crater Lake caldera in Ohio, USA (based on the United States Geological Survey, a bit modified): (a) After the formation of the volcano, there were eruptions on the side. Acid rain had a great impact on the regional weather. At this time, the magma chamber did not continuously move upward on a large scale. (b) During the magma reactivated stage, large-scale and multi-point eruptions hollowed out the magma chamber, resulting in the initial volcanic collapse, forming a lot of radioactive and ring fractures. (c) Radioactive and ring fractures formed along the fracture and collapse process before and after the initial volcanic formation of the fracture, and late mineralized liquid filling. (d) Finally, the central or flank magma intruded to form the central dome of the small rock stock

喷发产生的火山灰大约是 1980 年圣海伦斯火山喷发产生的 *VEI*(参见丁毅,2022)的 50 倍。在 Plinian 式火山喷发阶段,约 30 km^3 的火山碎屑物质喷出,从而消耗岩浆房中的岩浆,使其顶部无支撑。当熔结凝灰岩在 Plinian 末期喷发时,火山大厦开始沿着环形裂缝坍塌。崩塌产生额外的火山碎屑流和 10



图 4 世界著名破火山口实地照片和卫星照片:(a) 美国俄勒冈州的 Crater Lake 破火山口;(b) 俄国远东千岛群岛 Yankicha 破火山口;(c)美国 Valles 破火山口卫星照片;(d)埃塞俄比亚国 Erta Ale 破火山口;(e) 菲律宾的 Laguna 破火山口;(f) 美国黄石破火山口卫星照片;(g) 夏威夷 Mokuaweoweo 火山口;(h) 印度尼西亚 Toba 火山

Fig. 4 Site photos and satellite photos of some famous calderas: (a) Crater Lake Caldera in Oregon, USA; (b) Yankicha Caldera in the Kuril Islands in the Far East of Russia; (c) The satellite photo on the Valles Caldera in the USA; (d) Erta Ale Caldera in Ethiopia; (e) Laguna Caldera in the Philippines; (f) Satellite analysis photos of Yellowstone caldera in the USA; (g) Mokuaweoweoo Caldera in Hawaii; (h) Toba volcano in Indonesia (photos credited to National Geographic)

km 宽的破火山口。自那以后,火山口一直是几次小规模喷发,喷发的安山~流纹熔岩覆盖了火山口底部的部分区域。主要活动期时形成 10 km 宽的 Mount Mazama 山顶的破火山口和喷涌出席状火山碎屑流(著名的 Mazama 熔结凝灰岩)。而后,它们会逐渐下沉,形成一个由凹坑和阶地组成的嵌套结构 (Bacon et al., 2006; Nelson et al., 1994)。Crater lake 喷发形成的矿床保存完好,交通便利,是研究火山和岩浆过程的天然实验室。与火山口形成喷发相关的研究对火山学家来说至关重要,有助于他们了解大型爆炸性喷发、岩浆室中的成分分带和崩塌火山口机制。

3.2 Yankicha 破火山口

Yankicha 破火山口(图 4b)位于俄罗斯远东千岛群岛中(47.52°N,152.8°E),是火山口湖型,是安山岩浆喷发形成,除了破火山口内有两个熔岩穹隆外,历史时期还有水汽喷发 (Gorshkov, 1970; Sazonov et al., 1995)。Yankicha 岩浆房崩塌后,海水与火山水下喷口的过热水混合。这种混合创造了一个充满独特鱼类和植物的生态系统。大约 9.40 ka 前形成的一个 1.6 km 宽的小火山口在南部被狭窄地冲破,使得海水能够填满火山口。

3.3 Erta Ale 玄武质破火山口

Erta Ale 破火山口(图 4d),位于埃塞俄比亚国境内(13.6°N,40.67°E),是玄武质破火山口,山顶是 0.7 km × 1.6 km 的椭圆形火山口,另一个较大的 1.8 km × 3.1 km 宽的凹陷,平行于 Erta Ale 山脉的走向延伸,以东南侧的曲线断层陡坎为界。从这些裂隙中流出的玄武岩熔岩流涌入破火山口,局部溢出其边缘山顶火山口通常还至少有一个长期熔岩湖,该熔岩湖自 1967 年或 1906 年以来一直活跃。最近的裂缝爆发发生在北侧。(Harris et al., 2005; Pagli et al., 2012; Wiart et al., 2015)。

3.4 菲律宾 Laguna 破火山口

位于马尼拉东南(14.42°N, 121.27°E), 一个 12 km × 24 km 的椭圆形破火山口(图 4e),构成了吕宋岛最大湖泊。由更新世玄武岩—玄武安山岩火山形成。根据 Laguna 火山碎屑流沉积物中木炭的放射性碳年代测定表明其年龄约为 47 ka、27~29 ka 前至少两次大的爆炸性喷发期间形成,有玄武安山岩、安山岩、粗面岩、流纹岩 (Catane et al., 2005; Catane et al., 2004)。

3.5 夏威夷的“Mokuaweoweo”破火山口

该破火山口位于 Mauna Loa 火山山顶(图 4g)。美国夏威夷州夏威夷大岛 (the Big Island of Hawaii) 面积为 16636 km^2,位于太平洋中,是世界上最大的岛链,由 137 个火山岛组成,被认为是板块运动的热点地区(hot spots),大约 1 Ma 至 700 ka 前,构造运动导致了 6000 km 长的火山岛链的形成,这里存在的都是玄武质型破火山口。位于大岛的中南部的 Mauna Loa 火山是夏威夷大岛的五座活盾火山之一,研究表明 Mauna Loa 约 400 ka 才上升到海平面以上,它是夏威夷火山国家公园的主要景点,被认为是世界上最大的陆上活火山,海拔 4169 m,估计体积为 75000 km^3。Mokuaweoweo 破火山口面积为 6.2 km × 2.5 km,深度达 180 m,由三个重叠的不同洼地组成,从北向南,第一个圆形区域的直径约为 1 km, 中间部分为长方形,约为 4.2 km × 2.5 km。最南端的地区直径不到 1 km。Lua Hou 和 Lua Hohonu 是两个小火山口位于 Mokuaweoweo 的西南部。Mauna Loa 东部有 Kilauea 火山、西北部的 Hualalai 火山和东北部的 Mauna Kea 火山包围。从 1843 年至今,Mauna Loa 火山喷发了大约 33 次,平均每 6 年喷发一次。研究还表明,Mauna Loa 玄武质火山由易流动的熔岩流组成,由于熔岩的黏度极低,火山的喷发速度很快,熔岩能够长距离移动。大多数喷发发生在山顶火山口,然后迁移到在山谷带中喷发。除了山顶和两个山谷带之外,Mauna Loa 火山西北侧也是一些喷发的源头 (Amelung et al., 2007; Riker et al., 2009; Zimbelman et al., 2008)。

3.6 法属 Reunion 岛的 Piton del la Fournaise 玄武质破火山口

Reunion 岛位于西印度洋,Piton del la Fournaise

是地球上最活跃的火山口之一,喷溢出玄武质熔岩流,巴黎环球物理研究所运营的皮顿火山观测站(Piton de la Fournaise Volcano Observatory)持续对 Dolomieu 这座非常活跃的火山进行了监测,Dolomieu 是一个 400 m 高的玄武质破火山,在其侧面 530 ka 中共形成 Piton del la Fournaise 3 个破火山口,属于玄武质型破火山口,分别形成在 250 ka、65 ka 和不到 5 ka 前,是由火山向东逐渐坍塌形成的。许多火山碎屑锥点缀着火山口的底部及其外侧。自 17 世纪以来,发生了 150 多次喷发,其中大部分喷发产生了玄武岩熔岩流。1708 年、1774 年、1776 年、1800 年、1977 年和 1986 年,只有六次喷发源自火山口外侧的裂缝(Michon et al., 2009, Oehler et al. 2008)。

3.7 印度尼西亚的 Tambora 火山口湖型破火山口

Tambora 位于印尼桑巴瓦岛北岸,是近 200 多年最大的火山喷发。它现在高 2851 m,在 1815 年的喷发中失去了大部分顶部。目前火山仍然活跃;1880 年和 1967 年发生了较小的喷发,2011 年、2012 年和 2013 年发生了地震。Tambora 火山灾难性的喷发始于 1815 年 4 月 5 日,伴随着轻微的震动和火山碎屑流,之后发生了猛烈的爆炸将火山崩炸,火山碎屑流和海啸造成至少 1 万名岛民死亡,3.5 万多人的家园被毁。火山喷发前,Tambora 火山大约有 4300 m 高。喷发结束后为 2851 m 高,火山口成为一个直径约 6 km 的破火山口。Tambora 火山向大气中和附近喷发了多达 150 km^3 的火山灰、浮石和其他岩石碎块,以及包括估计 60 亿吨硫等有害气体的气溶胶。由于这种物质与大气中的气体混合,它阻止了大量阳光到达地球表面,最终使全球平均温度降低了 3 ℃。对印度尼西亚桑巴瓦岛及其周围岛屿的直接影响最为深远,农作物无法生长,约有 80000 人死于疾病和饥荒。1816 年,远在西欧和北美东部的世界部分地区在 6 月、7 月和 8 月经历了的大雪和霜冻。这种寒冷的天气事件导致这些地区农作物歉收和饥荒,1816 年被称为“无夏之年”。Tambora 火山地区最老的熔岩的年龄约为 50 ka,最年轻的是 1815 年沉积在印度尼西亚的火山灰和岩石层。在这些岩层之下是些更老的岩石,通过这些信息,地质学家或许能预测下次喷发的时间(Cole-Dai et al., 2009)。

3.8 Galápagos Islands 玄武质型破火山口

Galápagos Islands 是东太平洋上的群岛,该群岛由 13 个大岛屿和 6 个小岛屿,以及数 10 个小岛组成,面积超过 17000 km^2。它们是南美洲厄瓜多尔的一部分,距离厄瓜多尔海岸约 966 km。与夏威夷群岛相似,Galápagos Islands 是东太平洋一个热点地区,由一系列盾状火山和一些山顶火山口组成。费尔南迪纳岛(Fernandina Island)是火山链中火山活动最活跃的岛屿,有一个深椭圆形火山口,4×6.5 km。1968 年,一次大规模火山喷发导致了近代史上最大的火山口崩塌。像大多数盾状火山喷口一样,费尔南迪纳火山喷口不对称的方式坍塌,在某些地方下沉 350 m(Munro et al., 1996)。

3.9 俄罗斯堪察加半岛的 Uzon 火山口

堪察加半岛位于俄罗斯远东地区,半岛总面积为 270000 km^2,有 3 个野生动物保护许多其他保护区。堪察加半岛的主要景点是火山,共有 300 多座火山,其中有 30 座是活火山。Uzon 破火山口是其中热液系统最强、没有被人类改变过、自然美景仍然非常原始、以旅游为主的破火山口。Uzon 火山口形成于大约 40 ka 前,火山爆发形成了一个直径约 10 km、总面积为 150 km^2。边缘陡峭,约 200~900 m 深。这是一个火山湖型破火山口,像一个露天博物馆,这个独特的火山区造就的各种美丽的风景和特别的动物种群。在 200~350 m 的狭窄区域分为 5 个热场,包括数千个有大量蒸汽流的温泉、火山、泥浆、池塘和热湖。当你直接看到这个火山口时,你会感受到非凡的自然奇观(Global Volcanism Program, 2013)。

4 超级破火山口

人类还没有看到火山爆发指数 *VEI* >7 的超级火山爆发,但是通过熔结凝灰岩的体量计算出世界上有些火山的爆发指数 *VEI* >7、演化时间长、规模大(面积超过 100 km^2)。这些超大型的火山爆发曾经或者未来复活都会对全球生物演化产生影响。超级大型破火山口还有一个重要的特点,就是在沉降区域内有各种矿产。超级破火山口下方的岩浆房的结构和寿命控制着火山的危险性和资源潜力。镁铁质火山口的喷发的岩浆量约为 0.1~8 km^3,长英火山口喷发的岩浆量约为 1~5000 km^3(Smith, 1979),超级破火山口都是长英质火山~岩浆活动多次复活演化的结果。

4.1 黄石复活型破火山口

黄石火山口是复活型破火山口,是地球上 *VEI*>7 的超级火山,位于美国怀俄明州黄石国家公园(图 4f)。这座巨大的火山口经过多次喷发形成(2.1

Ma, 1.3 Ma, 0.64 Ma)。黄石火山口长达 72 km。最近的科学分析表明,该火山口下面的岩浆房比之前认为的大 2.5 倍,测量达到令人惊叹的程度,为:90 km×30 km×10 km (深),含有大约 25%的岩浆尚未冷凝。在 150 ka 前,其西侧有小规模的喷发。自上次喷发以来,黄石公园一直处于不安状态,地震活动性很高,不断发生隆起/沉降事件,热液活动强烈。使用欧洲航天局 ERS-2 卫星的雷达干涉测量,对黄石公园的一种新的地表变形模式进行了观测,到目前隆起了 8 cm, 推断是地下岩浆活动的结果(Wicks et al., 2006)。

4.2　美国 Valles 破火山口

Valles 火山(图 1c)大约在 1.25 Ma 前爆发,形成复活型破火山口,位于新墨西哥州境内(35.908°N,106.517°W),"超级喷发"在地面形成一个环形断裂,并呈近圆形下沉,形成一个 20 km × 23 km 的火山口凹陷。火山爆发之后,岩浆沿环状断裂侵出,形成穹隆式岩浆充填和火山口底板的隆起,形成了 Redondo Peak 复活穹隆(resurgent dome)。中央火山口底部的穹窿复活发生在 1.25~1.22 Ma 前,以 2 次火山活动为主,火山活动一直延续到 40 ka 前。地震波调查表明,火山口下方有一个低速带,目前存在着一个活跃的地热系统,地表有温泉和喷气孔(Goff et al., 1994;Reneau et al.,1996; Self et al., 2005)。

4.3　印尼苏门答腊岛的 Toba 破火山口

这是一个复活型破火山口(图 1h),是地球上较大的第四纪破火山口,35 × 100 km,它是在 1200 ka 前,经过四次熔结凝灰岩喷发形成的。其中最新的一次是大约 74000 年前,从今天的 Toba 湖西北端和东南端的喷出凝灰岩,喷发出 2800 km^3 的火山碎屑物质,是过去 2 Ma 来世界上最大的"超级火山"(喷发产物>1000 km^3),也是世界上最年轻的仍在活动的复活火山。火山口壁由古生代—中生代基岩组成,使 Toba 火山口成为地球的窗口。然后,这个火山口充满了大气降水,变成了 Toba 湖(体积为 240 km^3),其中萨莫西尔岛位于该湖的中部。爆发了近 2 Ma 来最大的一次火山喷发。目前的火山口分多阶段形成:发生在 840 ka、700 ka 和 74 ka。74 ka 的火山活动形成凝灰岩,体积为 2800 km^3。在火山口周围,凝灰岩的厚度超过 600 m。估算这次火山爆发导致了全球 6~10 年陷入低温的环境中(Costa et al., 2014; Knight et al. 1986; Rampino et al., 2000)。再加上 1500 km^3 的 PDC 沉积物(Costa et al., 2014)。

4.4　阿根廷 Cerro Galán 破火山口

CerroGalán 火山口(25°57′S; 66°57′W) 是一个直径约 35 km×25 km, 形成约在 6 ~ 2.2 Ma 的椭圆形破火山口(图 5),位于阿根廷西北部安第斯山脉的顶部,在阿根廷和玻利维亚的边界。在火山口内,熔结凝灰岩累积到 2 km 的厚度。在新生代期间该火山复活,沿着北部火山口环断裂,形成超过 3500 km^2 的熔结凝灰岩岩层,该火山口在形态、地质演化和构造背景上与美国新墨西哥州的 Valles 火山口极为相似(Francis, 1982)。这些英安岩的形成是非爆炸性的,由于其挥发性含量低,在火山口形成喷发的岩浆快速起泡(脱气)过程中丢失。复活后形成了目前 35 km × 20 km 的火山口形成火山口,称为 Cerro Galán 湖,在不到 10 ka 的时间里,周边还形成了一些小型喷口。35 km×20 km 的 Cerro Galán 复活火山口是迄今为止在安第斯山脉发现的最大的中新世破火山口。Cerro Galán 杂岩发育前在寒武纪晚期至晚古生代的片麻岩、角闪岩、云母片岩和变形千枚岩和石英岩的基底上。早中新世,基底沿大型南北逆断层抬升,形成地垒和地堑地形(Francis et al., 1978;Francis et al., 1983)。15 Ma 之前,该地区开始发生火山活动,形成了几个安山岩—英安岩火山,并在 7~4 Ma 期间导致至少九次熔结凝灰岩喷发。这些熔结凝灰岩被称为 Toconquis 熔结凝灰岩,它是在大约 2 Ma 的休眠期之后,流纹英安质岩浆的一次大喷发形成了 1000 km^3 的 Cerro Galán 熔结凝灰岩,火山口向各个方向延伸 100 km,形成了 30~200 m 厚的流纹质熔岩流层(Folkes et al., 2011)。先期的流纹英安岩 SiO_2 含量高于 Toconquis 熔结凝灰岩,但 K_2O 含量低于 Toconquis 熔结凝灰岩。这次喷发被认为是由一个坩埚块(cauldron block)进入岩浆房,而导致的灾难性坍塌(Sparks et al., 1985)。

5　破火山口分布规律

破火山口出现在所有全球构造—火山环境中,有一定的规律:玄武质型破火山口分布在海洋板块内热点的位置,但也出现在大洋中脊位置的一些不同板块边界(如: 东太平洋隆起, Fornari et al., 1984;冰岛地区, Gudmundsson, 1995)。安山岩—英安岩破火山口通常与聚敛板块边界有关,它们出现在岛弧(如:Tofua Island, Baker et al., 1971)和大陆边缘弧(如: Crater Lake, Bacon, 1983)中的火山

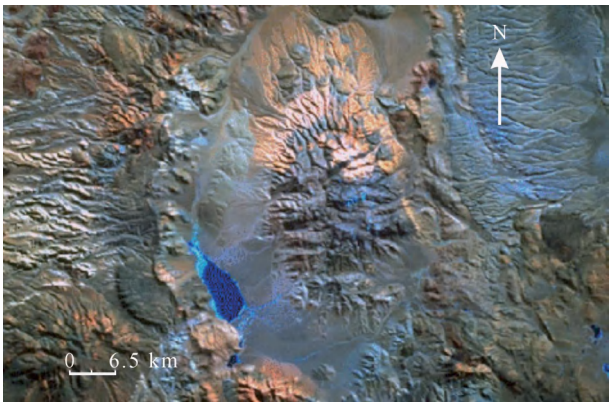


图 5 阿根廷 Cerro Galan 破火山口,是一个南北方向延展的椭圆形

Fig. 5 Cerro Galan Caldera in Argentina is an oval extending in the north—south direction

上。过碱性火山口与深断裂延展地区相关,如:东非裂谷的埃塞俄比亚的 Elliptic 破火山口(Acocella et al., 2002),但也出现在汇聚板块边缘局部伸展率异常高的区域(如:新西兰 Mayor Island,Houghton et al., 1992)或板块内海洋岛屿(如:Las Canadas caldera,Marti et al., 2000)。流纹岩火山口主要出现在大陆边缘地区,或与聚敛板块边界有关(如:新西兰 Taupo volcanic zone;Wilson et al., 1995),也与大陆地壳的裂谷作用有关(如:美国新墨西哥州中南部,Elston,1984)。还观察到流纹岩火山口与大陆热点(如:黄石公园破火山口,Hildreth et al., 1984),最近在一些海底弧—弧后系统中发现(如:新西兰岛 NE 方向 800 km 的 Kermadec 破火山口,Wright et al., 2003)。

6 破火山口与矿产

破火山口有关矿产大多数发现在复活型破火山口地区:大型破火山口的岩浆演化是长期和体量大的,后期相伴的热液活动延续时间长,因此它们所在的区域范围大多含有各种矿产,目前已知矿化有 U、Hg、Au—Ag、Mo、Li、Be、Sn、W 等。火山口通常也是地热活跃的场所,使其成为发电的潜在场所,例如在新西兰 Taupo 火山带(Bibby et al., 1995)。

破火山旋回的最初阶段,岩浆侵入上部地壳从而导致上伏于岩浆房的地层区域性隆起。或许在最初就已经形成环状构造,但是由于之后的火山喷发覆盖致使火山口附近的断裂消失而远处的得以保存,沿着这些呈岩脉展布的断裂方向往往被后期石英和其它物质混合的各种矿脉。

(1) 俄勒冈州的 Mahogany 破火山口形成环状岩墙和以环形穹隆形式的流纹岩环状岩脉,热液流体上升至洼地的沉积层中,形成锑矿和铀矿床。热水沉积型 Li 矿和 U 矿也发育在放射状和环状构造在破火山活化构造穹隆内,与岩脉在边缘充填。

(2) 玻利维亚索莱达破火山口最初阶段是大约 15 Ma 前在现破火山口西南边缘拉霍亚一带,有小型英安岩岩株群的侵入。这些岩株与强烈的热液蚀变及含少量 As、Sb、Mn、Bi、W、Sn 的低温热液脉型和浸染型 Au—Ag—Cu—Pb—Zn 矿化有关。在 8.8 Ma 前,破火山口边缘外环破裂而形成了一连串小型流纹岩穹窿。破火山口塌陷发生在约 5.4 Ma 前,同时伴随着索莱达凝灰岩的喷发。这些构成了一套由凝灰岩组成的岩石序列,面积为 240 km^2。该破火山口被认为是岩浆最初形成有多个突起岩株但实际上底部相连的岩基,后发生火山活动。

(3) 在美国内华达州 McDermitt 破火山杂岩中,过碱性热液矿脉延伸达 3 km,整个岩脉为一热液型铀矿床。破火山口实际上起着一个封闭盆地作用,将热液循环限制在盆地中。在 McDermitt 破火山杂岩中,也发现有热液汞、铀矿钼矿床、贵金属矿。

(4) 西班牙的 Rodalquilar 破火山口在复活期形成放射状和环状构造的金—明矾石矿床。年龄为 11.0 Ma。破火山口活化期中,环状穹隆被沿着其南面和北面的环状裂隙断裂所侵入并在其中心部位形成构造穹隆。中心构造穹隆的进一步活化导致在穹隆中放射状断裂的发育。再生的岩浆伴随着 Lazaras 火山灰流凝灰岩的爆发,在 Rodalquilar 破火山口活化穹隆内形成 Lomilla 破火山口,它具有放射状断裂,在东部有闪长岩株的形成并造成局部隆起和断裂带,随着 SO_2 从岩浆中逸出,酸性硫酸盐蚀变导致了沿东部环状断裂和裂隙中形成明矾石和发育大型水晶晶洞。

(5)美国内华达州是世界上著名的黄金产地,这一地区所分布的许多矿山都与大型复活型 Valles 破火山口有关,是世界上大型贵金属矿床聚集地。其中:Lake Owyhee 东部火山岩田的矿床也是由于区域断裂复活型破火山口。在 DeLamar—Duck 谷断裂带中,16 Ma 前喷发出流纹岩流层,DeLamar 和 Stone Cabin 金—银矿床产在其上部。矿脉的形成年代与流纹岩形成的年代一致,表明这些贵金属矿化就是流纹岩的形成所产生的,且矿脉充填了穹隆和熔岩流中的构造断裂(Mills et al., 1988)。

(6) 美国亚利桑那州 Jerome 地区的破火山口的

研究认为:Cu、Au、Ag 矿床均与远古宙火山爆发形成的流纹岩有关、破火山口断裂被硫化物矿脉充填和形成硫化物穹窿,还发现了罕见的黑烟柱。20 世纪初开采了 3300 万吨高品位铜矿,其中以 Cu 为主,Cu 含量为 4.79%,Au 为 1.22 g/t, Ag 为 45.6 g/t。

7　中国的破火山口研究

我国学者已经在本土发现了许多破火山口,如:直径大约 6 km 的河北的香炉山破火山口位于围场县南四道沟乡一带。地质构造位置处于康保—赤峰深断裂边部的清泉断陷盆地的南缘。面积约 100 km^2。区内主要堆积一套 K_2 的中酸性火山岩、是一保存较完整的破火山口构造,边部还有潜火山相形成。山东邹平破火山口地层有碱性玄武质—粗面质岩石,时代为 K_1, 火山碎屑厚度达 4000 m,发现有熔结凝灰岩。额尔古纳破火山口是大面积火山岩分布区,面积约 45000 km^2,已发现数处大型火山岩型多金属矿床,并在遥感解析清晰地显出多处破火山口。此外还发现有山东的七宝山、安徽的浮山、江西的密坑山、安徽的娘娘山、浙江的芙蓉山等破火山口等。

8　结论

(1)破火山口分为火山口湖型、玄武质型、复活型破火山口。这个分类简单、通俗、又具有成因意义。而以某岩石为主的成分分类只是具有描述意义上的分类。破火山口研究已经建立了一套人们习惯的标准的术语。

(2)初始火山的形成和后来破火山口的形成都与地下岩浆房不断演化有关,随着岩浆的演化,矿化液或沿着初始火山形成之前的区域断裂、或沿着破火山口的塌陷所形成的环形断裂和放射性断裂形成多点和多期的充填,甚至形成矿化穹隆,破火山口区域范围内和附近可能存在各种矿产。世界上许多复活型破火山口地区都是大型矿产的聚集地,而矿产的种类又受区域地层、火山形成前的区域构造、岩浆种类等多种因素控制。

(3)破火山口的研究不可缺失地对破火山口类型判别、地貌的描述(范围和深度)、火山活动分期、断裂与矿化、矿化脉与岩浆演化阶段的关系等方面进行深入的研究,包括任何破火山口之前的构造特征、区域老地层的、初始火山的形状和成分;我们现在看到的破火山口是分几期形成的、形成年代、崩塌事件的数量(单一事件还是多事件?)、崩塌几何形状(多块,对称还是不对称? 圆形还是椭圆形?);是否有矿化脉、它们的矿物组合特征、沿着火山前还是破火山形成之后的断裂充填? 矿化脉与岩浆演化的关系?

(4)笔者等列举 4 个大型复活破火山口,都是最初火山的爆发指数 *VEI* >7 的超级火山,复活喷发—塌陷后成为破火山口。这些大型火山的初始爆发形成期和复活期,都影响过地球气候和地球生物演化,研究大型古火山口的时代有助于理解地质时代中生物灭绝的因素;复活型破火山口底下的岩浆房是否还有剩余岩浆尚未冷凝? 是否还将爆发? 对人类的有无威胁? 中国在未来还有可能发现威胁全球生命演化的复活型破火山口, 作者认为:地质发现是一个对新的现象论证的过程:一种地质现象早就存在,需要有充分的国内外文献引述和逻辑分析去充分论证。如对一个疑似破火山口从地貌、火山岩形成的期、破火山口形成的过程等方面得到全面的论证,这就是发现! 笔者可以肯定地说,在中国发现大型破火山口才刚刚开始,期待发现大型复活型破火山口,为世界在这方面的研究做出中国贡献同时也为国家矿产资源安全保障做出贡献。

致谢:审稿专家对本文提出了很好的修改意见,特此致谢。本文第一作者 20 世纪 80 年代在中国地质科学院地质研究所火山岩室工作,在此表示对导师李兆鼐先生的怀念,及对其他同事的思念。

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "**&**" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "**#**" is in Chinese without English abstract)

丁毅. 2022. 火山学述评[J]/[OL]. 地质论评, http://www.geojournals.cn/georev/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20226803032&flag=1

魏海泉, 白志达, 刘永顺. 2022. 火山碎屑岩的百年研究[J]/[OL]. 地质论评, http://www.geojournals.cn/georev/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20226803040&flag=1

Acocella V. 2021. Volcano——technic process. Switzerland: Springer: 29~30, 163~203.

Acocella V. 2007. Understanding caldera structure and development: an overview of analogue models compared to natural calderas. Earth Sci. Rev., 85(3): 125~160.

Acocella V, Korme T, Salvini F, Funiciello R. 2002. Elliptic calderas in the Ethiopian Rift: The control of pre-existing structures. J. Volcanol. Geotherm. Res., 119: 189 ~ 203.

Amelung F, Yun S H, Walter T R, Segall P, Kim S W. 2007. Stress Control of Deep Rift Intrusion at Mauna Loa Volcano, Hawaii. Science, 316 (5827): 1026 ~ 1030; DOI: 10. 1126/science. 1140035.

Bacon C R. 1983. Eruptive history of Mount Mazama and Crater Lake Caldera, Cascade Range, USA. J. Volcanol. Geotherm. Res., 18: 57 ~ 115.

Bacon C R, Lanphere M A. 2006. Eruptive history and geochronology of Mount Mazama and the Crater Lake region, Oregon. Geol. Soc. Amer. Bull., 118: 1331~1359.

Baker P E, Harris P G, Reay A. 1971. The geology of Tofua Island, Tonga. Bulletin des Sociétés Chimiques Belges, 8: 67 ~ 79.

Bibby H M, Caldwell T G, Davey F J, Webb T H. 1995. Geophysical evidence on the structure of the Taupo Volcanic Zone and its hydrothermal circulation. J. Volcanol. Geotherm. Res., 68: 29 ~ 58.

Branney M, Acocella V. 2015. Calderas. In: Sigurdsson H, Houghton B, McNutt S, Rymer H J. eds. The Encyclopedia of Volcanoes, 2nd ed. Landon: Elsevier Academic Press: 299~319.

Brown R J, Andrews G D M. 2015. Deposits of pyroclastic density currents. In: Sigurdsson H, Houghton B, McNutt S, Rymer H J. eds. The Encyclopedia of Volcanoes, 2nd ed. Landon: Elsevier Academic Press: 631~647.

Catane S G, Taniguchi H, Goto A, Givero A P, Mandanas A A. 2005. Explosive volcanism in the Philippines. CNEAS Monograph Ser., Tohoku Univ., 18: 1~146.

Catane S, Ui T, Arpa M B, Cabria H B and Taniguchi H. 2004. Potential hazards from the youngest explosive eruptions of Laguna Caldera to metropolitan Manila, Philippines. Western Pacific Geophysics Supplement, 85(33): A-89.

Camp V. 2022. How volcanoes work——ignimbrite and ignimbrite textures [OL]. http://www. sci. sdsu. edu/how_volcanoes_work/ignimbrite_textures. html.

Cole J W, Milner D M, Spinks K D. 2005. Calderas and caldera structures: A review. Earth-Science Reviews, 69: 1~26.

Cole-Dai J, Ferris D, Lanciki A, Savarino J, Baroni M, Thiemens M H. 2009. Cold decade (AD 1810~1819) caused by Tambora (1815) and another (1809) stratospheric volcanic eruption [J]/[OL]. Geophysical Research Letters, 36: L22703; https://doi. org/10. 1029/2009GL040882

Costa A, Smith V C, Macedonio G, Matthews N E. 2014. The magnitude and impact of the Youngest Toba Tuff super-eruption. Frontiers in Earth Science, 2(16):1~8.

Ding Yi. 2022&. A review on volcanology. Geological Review, http://www. geojournals. cn/georev/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no=20226803032&flag=1

Elston W E. 1984. Mid-Tertiary ash-flow cauldrons, southwestern New Mexico. J. Geophys. Res., 89B: 8733 ~8750.

Folkes C B, Wright H M, Cas R A F, Silva S L D, Lesti C, Viramonte J G. 2011. A re-appraisal of the stratigraphy and volcanology of the Cerro Galán volcanic system, NW Argentina. Bull. Volcanol., 73: 1427~1454; https://doi. org/10. 1007/s00445-011-0459-y

Fornari D J, Ryan W B F, Fox P J. 1984. The evolution of craters and calderas on young seamounts: insights from sea MARC 1 and SEABEAM sonar surveys of a small seamount group near the axis of the East Pacific Rise at 108N. J. Geophys. Res., 89: 11069 ~ 11083.

Francis P W. 1982. The Cerro Galan caldera, Argentina. Earthq. Inf. Bull., 14: 124~133.

Francis P W, Ocallaghan L, Kretzschmar G A, Thorpe R S, Sparks R S J, Page R N, de Barrio R E, Gillou G, Gonzalez O E. 1983. The Cerro Galan ignimbrite. Nature, 301: 51~53. https://doi. org/10. 1038/301051a0

Francis P W, Hammill M, Kretzschmar G, Thorpe R S. 1978. The Cerro Galan caldera, north-west Argentina and its tectonic setting. Nature, 274: 749~751.

Global Volcanism Program. 2013. Volcanoes of the World, v. 4. 10. 6 (24 Mar. 2022). In: Venzke E. ed. Smithsonian Institution [OL]. Downloaded 28 May 2022. https://doi. org/10. 5479/si. GVP. VOTW4-2013.

Goff F, Gardner J N. 1994. Evolution of a mineralized geo-thermal system, Valles Caldera, New Mexico. Econ. Geol., 89: 1803 ~ 1832.

Gorshkov G S. 1970. Volcanism and the Upper Mantle; Investigations in the Kurile Island Arc. New York: Plenum Publishing Corp. : 1 ~ 385.

Gudmundsson A. 1995. Infrastructure and mechanics of volcanic systems in Iceland. J. Volcanol. Geotherm. Res., 64: 1~22.

Harris A J L, Carniel R, Jones J. 2005. Identification of variable convective regimes at Erta Ale Lava Lake. J. Volcanol. Geotherm. Res., 142: 207~223.

Hildreth W, Christiansen R L, O'Neil J R. 1984. Catastrophic isotopic modification of rhyolite magma at times of caldera subsidence, Yellowstone plateau volcanic field. J., Geophys. Res., 89B: 8339 ~ 8369.

Holohan E P, Schopfer M P J, Walsh J J. 2015. Stress evolution during caldera collapse. Earth Planet. Sci. Lett., 421: 139~151.

Houghton B F, Weaver S D, Wilson C J N, Lanphere M A. 1992. Evolution of a Quaternary peralkaline volcano: Mayor Island, New Zealand. J. Volcanol. Geotherm. Res., 51: 217~236.

Knight M D, Walker G P L, Ellwood B B, Diehl J F. 1986. Stratigraphy, paleo magnetism, and magnetic fabric of the Toba Tuffs: Constraints on the sources and eruptive styles. J. Geophys. Res., 91(10): 10355~10382.

Lipman P W. 1997. Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma chamber geometry. Bull. Volcanol., 59: 198 ~ 218.

Marti J, Gudmundsson A. 2000. The Las Canadas caldera (Tenerife, Canary Islands): an overlapping collapse caldera generated by magma-chamber migration. J. Volcanol. Geo-therm. Res., 103: 161~173.

Mills B A, Boden D R, Sander M V. 1988. Alteration and precious metal mineralization associated with the Toquima caldera complex, Nye County, Nevada. In: Schafer R W, Cooper J J, Vikre P G. eds. Bulk-Mineable Precious Metals Deposits of the Western United States. Symposium Proceedings. Geol. Soc., Nevada: 303 ~ 332.

Michon L, Cayol V, Letourneur L, Peltier A, Villeneuve N, Staudache T. 2009. Edifice growth, deformation and rift zone development in basaltic setting: Insights from Piton de la Fournaise shield volcano (Reunion Island). J. Volcanol. Geotherm. Res., 184: 14~30.

Michon L, Massin F, Famin V, Ferrazzini V, Roult G. 2011. Basaltic calderas: collapse dynamics, edifice deformation and variations of magma withdrawal. Journal of Geophysical Research, 116 (B03209): 1~18, doi:10. 1029/2010JB007636

Munro D C, Rowland S K. 1996. Caldera morphology in the western Galapagos and implications for volcano eruptive behavior and mechanisms of caldera formation. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 72: 85~100.

Nelson C H, Bacon C R, Robinson S W, Adam D P, Bradbury J P, Barber J H Jr, Schwartz D, Vagenas G. 1994. The volcanic, sedimentologic, and paleolimnologic history of the Crater Lake caldera floor, Oregon: evidence for small caldera evolution. Geol. Soc. Amer. Bull., 106: 684~704.

Oehler J F, Lenat J F, Labazuy P. 2008. Growth and collapse of the Reunion Island volcanoes. Bull. Volcanol., 70: 717~742.

Pagli C, Wright T J, Ebinger C J, Yun S H, Cann J R, Barnie T, Ayele A. 2012. Shallow axial magma chamber at the slow-spreading Erta Ale Ridge. Nature Geoscience, 5: 284~288; https://doi. org/10.

1038/ngeo1414

Rampino M R, Ambrose S H. 2000. Volcanic winter in the Garden of Eden: the Toba super-eruption and the late Pleistocene human population crash. In: McCoy R W, Heiken G. eds. Volcanic Hazards and Disasters in Human Antiquity, Geol. Soc. Amer. Spec. Pap., 345: 71~82.

Reneau S L, Gardner J N, Forman S L. 1996. New evidence for the age of the youngest eruptions in the Valles caldera, New Mexico. Geology, 24: 7~10.

Riker J M, Cashman K V, Kauahikaua J P, Montierth C M. 2009. The length of channelized lava flows: Insight from the 1859 eruption of Mauna Loa volcano, Hawaii. J. Volcanol. Geotherm. Res., 183: 139~156.

Sazonov A P, Gavrilenko G M. 1995. Lithology and geochemistry of bottom sediments in the crater bay, Ushishir volcanic island, Kuril Islands. Volc. Seism., 16: 387~400.

Self S, Wolff J A. 2005. Outstanding issues about relationships between large-scale calderas, ignimbrite volumes, and magma body shape and longevity. Workshop Caldera Volcanism: Analysis, Modelling and Response, Parador de las Canadas, Abs.: 15.

Smith R L. 1979. Ash-flow magmatism. Geol. Soc. Am. Special Pap., 180: 5~28.

Sparks R S J, Francis P W, Hamer R D, Pankhurst R J, O'Callaghan L O, Thorpe R S, Page R. 1985. Ignimbrites of the Cerro Galan caldera, NW Argentina. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 24(3~4): 205~248.

Walker G P L. 1984. Downsag calderas, ring faults, caldera sizes, and incremental caldera growth. J. Geophys. Res., 89B: 8407~8416.

Wei Haiquan, Bai Zhida, Liu Yongshun. 2022&. Centurial study on pyroclastic rocks [J]/[OL]. Geological Review, http://www.geojournals.cn/georev/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20226803040&flag=1

Wiart P, Oppenheimer C. 2005. Large magnitude silicic volcanism in north Afar:The Nabro volcanic range and Ma'alalta volcano. Bull. Volcanol., 67: 99~115.

Wicks C, Thatcher W, Dzurisin D, Svarc J. 2006. Uplift, thermal unrest and magma intrusion at Yellowstone caldera. Nature 440: 72~75; https://doi.org/10.1038/nature04507

Wilson C J N, Houghton B F, McWilliams M O, Lanphere M A, Weaver S D, Briggs R M. 1995. Volcanic and structural evolution of Taupo Volcanic Zone, New Zealand: a review. J. Volcanol. Geotherm. Res., 68: 1~28.

Wright I C, Gamble J A, Shane P A R. 2003. Submarine silicic volcanism of the Healy caldera, southern Kermadec arc (SW Pacific): Volcanology and eruption mechanisms. Bull. Volcanol., 65: 15~29.

Zimbelman J R, Garry W B, Johnston A K, Williams S H. 2008. Emplacement of the 1907 Mauna Loa basalt flow as derived from precision topography and satellite imaging. J. Volcanol. Geotherm. Res., 177: 837~84.

A review on the study of caldera

DING Yi[1, 2, 3], SUN Jiming[3], WU Yunxia[4]

1) *College of Interdisciplinary*, *Hebei GEO University*, *Shijiazhuang*, 050031;

2) *Institute of Geological Surveys*, *Hebei GEO University*, *Shijiazhuang*, 050022;

3) *AfricanResources and Environment Research Center*, *Hebei GEO University*, *Shijiazhuang*, 050022;

4) *College of Earth Sciences*, *Hebei GEO University*, *Shijiazhuang*, 050031

Abstract: The research on volcanic caldera is a hot spot that scholars in China and abroad continue to pay attention to. This is because the magma that formed the Caldera has a long evolution time, and it is mostly the gathering place of large polymetallic, precious metal, uranium, and other deposits. The formation of large calderas has had a great impact on the evolution history of global lives. This paper summarizes the concept of the caldera, the classification and terms confusing scholars, the world-famous caldera and its formation theory, the relationship between the research understanding of large caldera and the formation of ore deposits, the research on Caldera in China, and the direction of future efforts. In fact, it has built a continuing upward step on the ladder of scientific research. Chinese scholars should conduct high-level research in this field and make Chinese contributions to the protection of national strategic resources and to the study of the world's caldera.

Keywords: caldera; concept; classification; large caldera; mineral resources

Acknowledgements: Thanks go to the fund by 2021 Talent Attraction Project of Hebei Education Bureau (No. 360208)

First author: DING Yi, male, born in 1957, professor, expert at volcano, maar—kimberlitic diatreme and meteorite crater; Email: chinakimberlite@126.com; vwsource@hotmail.com

Manuscript received on: 2022-06-04; Accepted on: 2022-07-07; Network published on: 2022-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.07.095　　**Edited by**: ZHANG Yuxu