

火山学述评

丁毅^{1,2)}

1) 河北地质大学交叉科学学院,石家庄,邮编: 050031;

2) 河北地质大学地质调查研究院,石家庄,邮编:050022



内容提要:火山学研究有了长足的进步。本文总结近些年全球火山学研究各个方面的成果,包括对火山基本概念的新的认识、火山机构、火山的各种分类、火山岩石学和地球化学、火山岩相学、评估火山爆发大小的火山爆发指数、岩石和地球化学分类、各种常量和微量元素区分图、活火山分布与板块构造理论的关系、活火山给人类带来的灾害与利益和活火山的监测、曾经的火山活动与生物毁灭、单成因火山研究等。火山—构造是未来火山学研究的一个方向,通过火山与构造关系的研究以揭示火山的分布和地球的演化。火山喷出的岩浆是其通过地下以岩墙或管道形式为通道运移到地表的结果。中朝边境上的长白山的位置是个特例,应当值得深入的研究。中国分布有许多新生代火山,它们是否为单成因火山、这些火山在成分上是否有演化规律、它们的分布与大地构造的关系等都有待深入和系统的研究。

关键词:火山;火山学;火山机构;爆发指数;板块构造;火山监测

火山是地球上唯一最显著和广泛分布的地貌,活动时以其不可抗拒的怒吼威胁着人类,宁静时以其神奇、美貌、温泉等吸引着人类。2022 年伊始,Tonga 火山爆发唤醒了人们对火山的好奇和关注,它是自 1991 年菲律宾的 Pinatubo 火山喷发 30 年以来全球规模最大的一次。火山学(volcanology)涉及到哪些方面的研究? 诸如:什么是火山? 地球上分布有多少活火山? 火山的分布有规律吗? 对火山的分类是怎样的? 国内的许多学者已经对中国新生代火山(刘嘉麒,1999;刘若新等,1999)、火山岩岩石学(李兆鼎等,1985)、火山岩相学(陶奎元,1994)进行了总结性的研究,然而全面总结火山学的在各个方面的进展十分必要,特别是每经过三至五年,一个学科研究需要总结,将全球在这个学科的研究成果进行归纳和集合,在科研的梯子上不断搭阶,科研就是踩在一层一层的梯子上的阶向上继续攀登,本文正是出于这个目的,对全球火山学的各个方面的研究做个总结。

1 火山基本概念、火山机构和火山作用

1.1 火山基本概念

过去对于火山的概念仅仅局限在地下深部岩浆通过火山通道喷出地表的岩浆碎屑堆积所形成的锥状体,现在对于火山—地下岩浆活动在地表的表现有了更广泛的认识:包括地下岩浆侵入过程中遇到地表丰富的含水层,导致“降火”作用的发生,地下气液爆炸造成地下开始塌陷而形成低于地面的火山口。火山定义从最初只对喷发碎屑和溢流熔岩的认识、各种火山地貌的描述、到近些年的研究成果交流的迅速使得火山学更精准、更广泛和简单地给火山下一个定义:地球和其他行星地壳上的“喷口”,喷出熔融的岩浆、热的岩石碎屑、热气体,火山活动是一个星体内部释放热的过程(Decker, 2020; Acocella, 2021)。对火山最新的定义还包括除了地球以外的行星上围绕在喷口(vent)周围所形成的所有地质建造或称火山机构(volcanic edifice),有熟知的由岩浆喷出的火山灰、火山块体组成的火山渣堆,同时也强调“喷口”仅喷出围岩碎屑,即形成以喷口为中心的略高出地面的环状层理堆积、以水汽喷射造成地下岩石塌陷从而形成负地形的火山口(丁毅等,2019)。

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:2022-03-22;改回日期:2022-05-11;网络首发:2022-05-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.05.085

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; vwsourc@hotmail.com。

2018 年在西班牙召开的火山会议上,重点讨论了地下岩浆与富含地下水层相互作用形成的水汽造成的各种类型的玛珥式火山。近十年持续还在喷发水汽的火山有:美国的 Tongariro (Jolly et al., 2014)、哥斯达黎加的 Poás (De Moor et al., 2016)、日本的 Mount Ontake (Yamaoka et al., 2016), 以及美国的黄石火山地质公园内的喷气口 (Stovall et al., 2019)。

1.2 火山机构

各种不同的碎屑堆积形成了许多围绕着火山喷口组成火山机构,多数火山为高处地面的锥状体

(cone),在其上部有圆形火山口 (volcano crater),形成火山口的原因是火口 (vent) 喷射物质到火口外后,最后没有碎屑和气体喷出了进而失去了对火山口表明的支撑。火山口形成之后再次爆发,从而导致火口塌陷,而使得“碗”的范围可以很大,形成“破火山口”(caldera),也可以因不同次数的地下爆炸所形成的在地表大小不一有深有浅的玛珥式火山口 (丁毅等,2022),在大型火山锥状体的侧坡上还可以形成寄生火山口 (peripheral vents)。岩浆喷出形成火山岩 (volcanic rocks),岩浆没有喷出而是在地下冷凝形成了侵入岩 (plutonic or intrusive rocks),

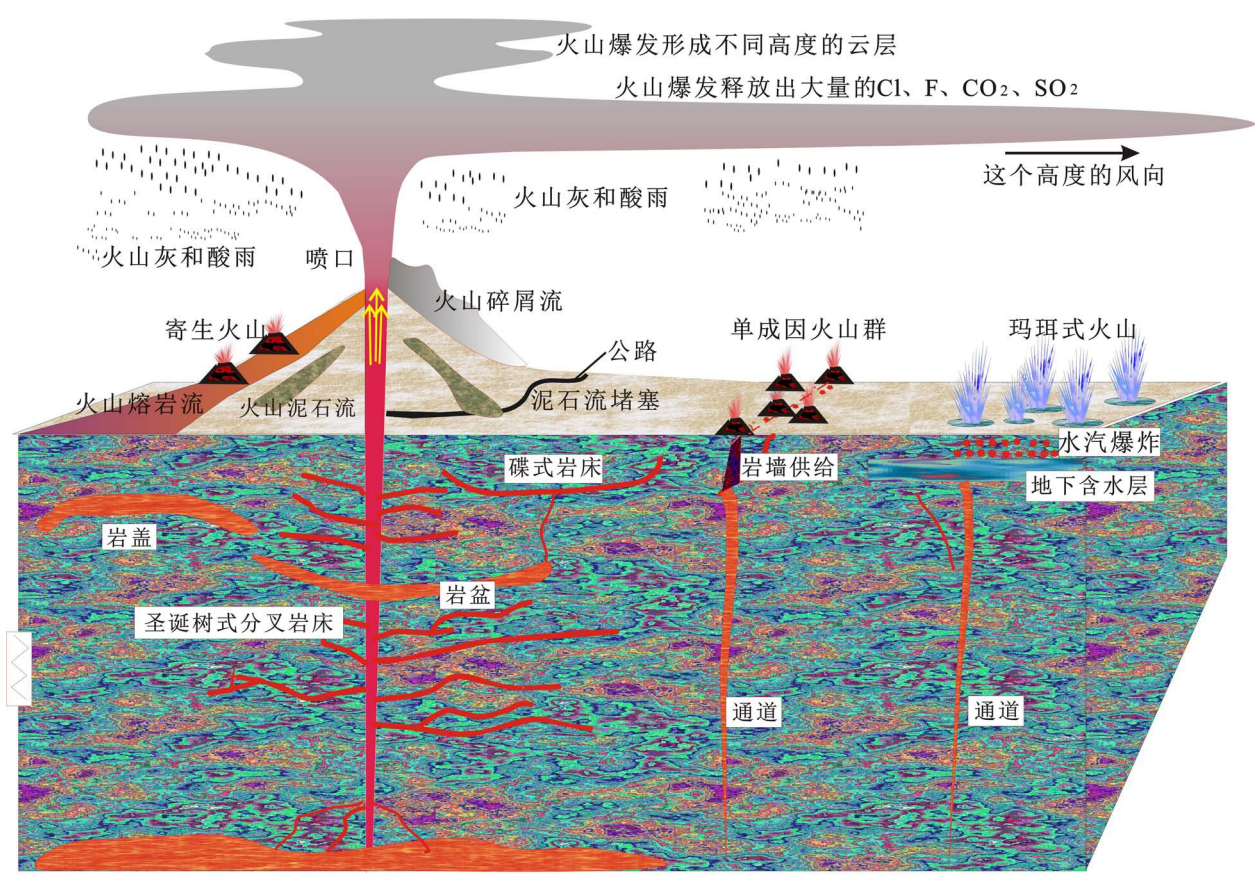


图 1 火山机构、火山管道、单成因火山、玛珥式火山、火山地质灾害示意图

Fig. 1 Schematic diagram of volcanic institutions, volcanic plumbing system, monogenic volcanoes,

Maar volcanoes and volcanic eruption disasters

火山沿管状通道由地下深处起源向地表运移,地下起源可能是多脉聚集性的,上升的途中形成“圣诞树式分叉”岩床、岩盆、岩盖、蝶形岩床。基性和超基性岩浆上升速度快,在近地表以岩墙形状供给形成“单成因”火山群,当岩浆遇到近地表丰富含水层则产生气液继续上冲,水汽压力增大导致地下爆炸导致地表塌陷而形成负地形的水汽喷口。火山喷发形成在高空飘动的火山灰团,直接影响飞行器飞行和形成有害气体污染和酸雨加火山灰的降落,泥石流和火山熔岩流会堵塞公路

The volcano migrated from the deep origin to the surface along pipe. The underground origin may be in a way of multi-vein aggregation, in ways forming a "Christmas tree bifurcation" sills, lopolith, laccolith and saucer shape sill. The basic and ultrabasic magma rises rapidly to surface, in shape of dike to form a "monogenetic" volcanic cluster. When the magma encounters a rich aquifer near the surface, gas and liquid continue to rush up with rising pressure, resulting in underground explosion. The underground explosion drives the surface to form a completely negative crater. Volcanic eruptions form volcanic ash masses floating at high altitude, which directly affects aircraft flight and forms harmful gas pollution, creates the falling of acid rain and volcanic ash. Debris flow and volcanic lava flow will block roads

它们统称为岩浆岩 (magmatic rocks)。岩浆通过管道 (conduit) 上侵, 形成了在地下的岩脉 (dike)、岩床 (sill)、岩盆 (lopolith)、岩盖 (laccolith) (图 1), 连同喷出的各种岩浆建造统称为火山管道体系 [volcanic plumbing system, Burchardt (2018)]。岩浆持续供给形成了在各个地区完全不同的一系列的火山机构, 特别到了火山演化后期, 由于水汽、二氧化碳、硫化氢等气体的参与, 形成火山气液体系统 (hydrothermal system), 加上岩浆在管道上侵的过程中同化石灰岩所形成的在地下的各种矿床, 如宁芜玢岩铁矿的形成 (丁毅, 1992)。

1.3 火山学和研究意义

传统意义上的火山学研究火山、火山岩、地球化学、侵入体, 研究手段包括描述、测量、野外和显微镜观察、岩石常量元素分析手段进行在火山地貌上的分类、火山岩石的鉴定、火山岩的命名和分类、火山岩和有关矿产的规律、火山的分布与板块的关系等方面的研究。现代火山学的研究手段增加了遥感解析、无人机航拍进行地貌分析、高精度地震测试、电子显微分析、微量元素分析、岩石副矿物的微量元素和微区分析、利用互联网的便捷获得全球资料和大数据库建立模型, 例如微量元素比值图划分板块区域。然而, 现代火山学都是建立在传统火山研究的基础上而实现的, 脱离不了在野外仔细观察现象和坚实的研究基础。在现代火山学的定义上, Acocella (2021) 强调“火山—构造”应当是火山学一个重点领域, 强调大地构造与火山的关系、地震监测和预警方面的研究; Burchardt (2018) 认为火山学研究是一个对火山—火成管道系统 (VIPS, Volcanic and Igneous Plumbing System) 的研究, 即地表火山和地下侵入体密不可分; 火山喷发与地下岩浆和有关矿化是紧密相关的 (Blundy et al., 2021)。本文认为: 火山学是从研究大地构造与火山的关系入手, 研究研究整个火山和火成管道, 岩浆起源的深度与位置、岩浆成分和建造各种地质体的关系。

火山作用是表述火山形成的过程, 包括岩浆起源、岩浆在通道中的运动和所遇到岩石的混染、火山喷出地表时的环境对火山形成地貌形态的影响和所形成的不同的火山建造、火山碎屑物经过搬运、熔接 (welding)、冷却所形成的不同的组成碎屑和结构的火山岩、还包括火山持续活动所形成的地热、热泉、喷气、火山热液矿床形成的过程。火山作用的这些内容形成了火山学研究的各个方面也是火山学研究的意义所在:

(1) 岩浆起源、火山形成的机理、形成与大地构造的关系;

(2) 火山地貌的分类、根据火山形态重塑火山形成时的环境、恢复火山影响的范围等;

(3) 火山岩石学研究: 因为岩浆起源深度的不同、火山通道的影响差异、所遇围岩的种类和物理性质不一, 从而对最终火山岩的形成受着岩浆成分、搬运速度、形成过程各种因素的影响;

(4) 通过岩石常量和微量地球化学研究可以溯源岩浆起源、形成过程、所处的大地构造环境;

(5) 采取多种手段进行火山灾害的研究、监测和预防;

(6) 火山地震学研究: 测量活火山地下岩浆房的能量和预警聚集和喷发的可能性、岩浆运移的规律, 及时向火山预警中心提供地震数据;

(7) 古火山、破火山口与矿产的关系的研究, 这方面的发现有助于提高国家资源的安全性;

(8) 活火山研究、开发与利用: 这涉及火山持续活动所形成的地热、热泉、喷气;

(9) 积极参与国际合作: 火山—板块构造有许多未解的课题, 不可能由一个小项目来完成, 需要多国参与合作多科学联合来进行科学研究, 火山研究是一个“大科学”的研究 (Papale and Garg, 2022)。

2 火山分类

2.1 按照现在火山的外观不同而分类

火山的爆发 (explosion)、侵出 (extrusion)、串珠排列的火山形成裂隙流 (fissure vents)、溢流形成了不同的火山地貌: 层火山 (stratovolcanoes)、盾形火山 (shield volcanoes)、火山渣锥 (cinder volcanoes)、火山熔岩锥 (lava cone)、玄武熔岩柱 (basaltic lava pillar) 和火山穹窿 (lava dome)、熔岩流台地 (lava platform)、破火山口 (caldera)。

层火山是火山爆发和溢流交替作用堆积形成一层又一层的火山, 最终所形成火山锥体坡面因岩浆成分不同有坡度上的变化。火山通过火山口释放气体、火山灰、浮石, 火山还可以形成泥石流 (lahars)。层火山多分布在环太平洋火山带, 是对人类的威胁大的一种。例如印度尼西亚的 Krakatoa (位于图 2a-C)、菲律宾的 Mt. Pinatubo (位于图 2a-D)、日本的 Fuji (位于图 2a-F)、美国华盛顿州的 Mt. St. Helens (位于图 2a-H)、加利福尼亚州的 Mount Lassen (位于图 2a-H)、俄勒冈州的 Mount Hood (位于图 2a-H)、厄瓜多尔的 Sangay (位于图 2a-J)、意大利的

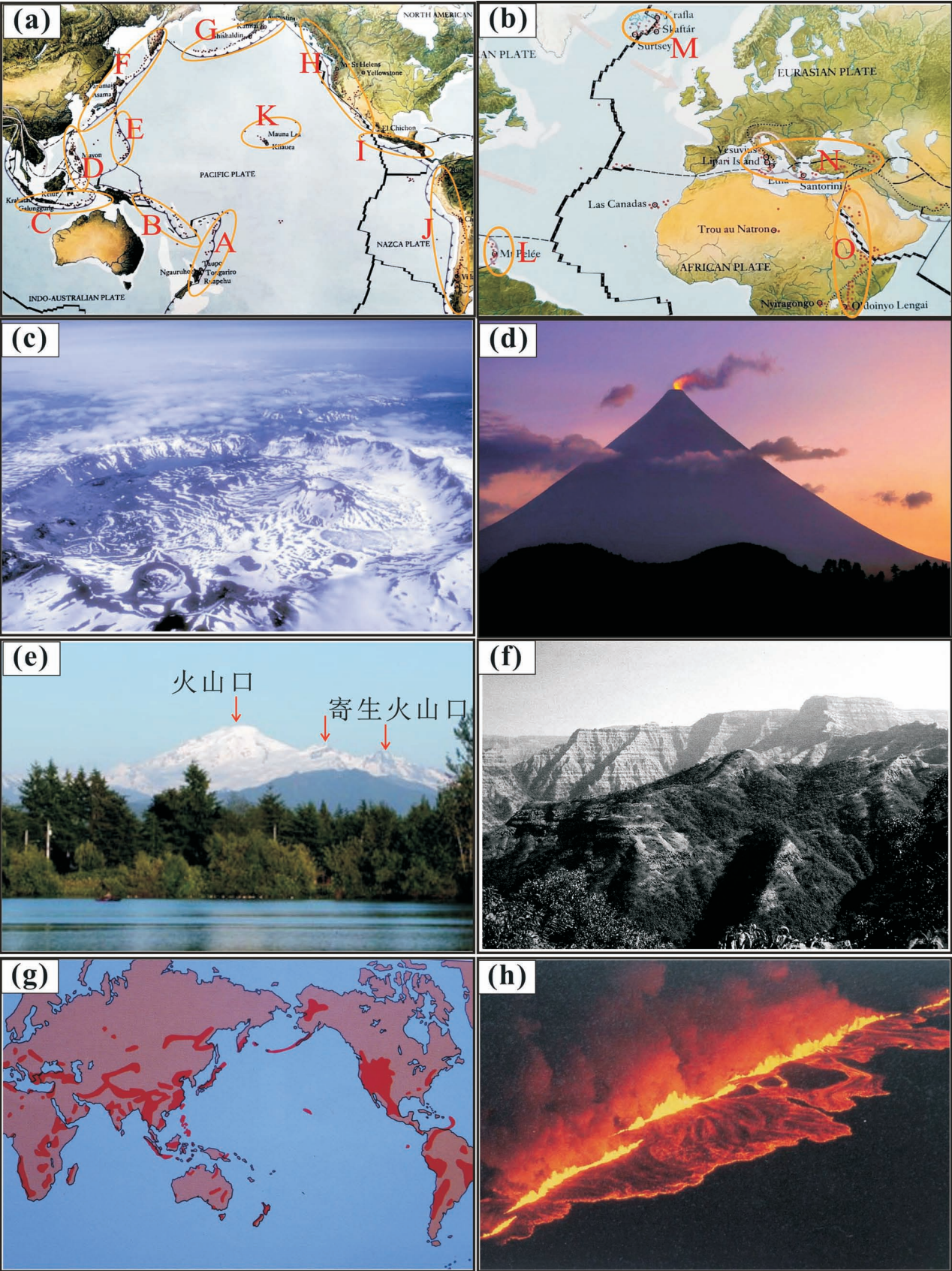


图2 全球火山分布、典型火山、裂隙喷发照片、地热分布图

Fig. 2 Global volcanoes distribution map, typical volcano photo, fissure eruption photo, geothermal distribution map

(a) 太平洋火山分布图,其中,A—新西兰和汤加火山带;B—索罗门群岛火山带;C—印度尼西亚火山带;D—菲律宾火山带;E—伊豆—马里亚纳火山带;F—日本岛火山带;G—阿留申群岛火山带;H—温哥华岛—加利福尼亚州火山带;I—中美洲火山带;J—南美洲火山带;K—夏威夷岛火山热点地区。(b)大西洋和地中海火山分布图,其中,L—西印度群岛火山带;M—大西洋中脊冰岛火山带;N—意大利—地中海火山带;O—非洲裂谷火山带。(c) Aniakhak 破火山口。(d) 菲律宾的马荣锥型火山。(e) 加拿大—美国边境上的 Baker 火山(箭头所指的西南侧2个小火山为寄生火山)。(f) 印度德干(Deccan)熔岩流台地。(g) 全球地热分布图。(h) 冰岛火山区裂隙喷发。(a)、(b)、(f)、(g)、(h) 据 van Rose and Mercer (1991)

(a) Distribution map of Pacific volcanoes, in which A—the volcano belt of New Zealand and Tonga, B—the volcano belt of Solomon Islands, C—the volcano belt of Indonesia, D—the volcano belt of Philippines, E—the volcano belt of Izu—Mariana Islands, F—the volcanic belt of Japan islands, G—the volcanic belt of Aleutian Islands, H—the volcanic belt of Vancouver Island and California, I—the volcanic belt of Central America, J—the volcanic belt of South America, K—the volcano region of Hawaii hot spots; (b) Distribution map of volcanoes in the Atlantic and Mediterranean, in which, L—the volcano belt of the West Indies, M—the Iceland volcanic area in the middle ridge of the Atlantic Ocean, N—the Italian Mediterranean volcanic belt, and O—the African rift volcanic belt; (c) Aniakhak caldera; (d) Mayon cone volcano in the Philippines; (e) Baker volcano on the border between Canada and the United States (the two small parasitic volcanoes on the southwest side indicated by the arrow); (f) Deccan lava platform in India; (g) global geothermal distribution map; (h) fissure eruption in the volcanic region of Iceland. (a), (b), (f), (g), (h) based on van Rose and Mercer (1991)

Mount Etna (位于图 2b-N)。

盾形火山是玄武质溢流熔岩形成的一种坡度平缓(坡度 $<10^{\circ}$)的火山,火山作用持续时间长,爆炸很少。这种火山喷发的熔岩流体量可以很大。盾形火山最初以爆发开始,形成的火山集块岩和火山角砾岩,这些碎屑岩位于底部,之后被溢流出的玄武质熔岩覆盖,熔岩从火山口向外移动很远,因大多数不涉及火山爆发,使得火山监测较为安全。夏威夷的 Mauna Loa 火山是盾状火山中最大的一座,海拔 4103m 海平面,其他著名的盾状火山还包括美国夏威夷的 Mt. Kilauea (位于图 2a-K)。

火山渣锥 (scoria cones):是一种简单的锥形火山,火山口呈碗形,火山峰最高大约 300 多米,侧面由松散、破碎的火山渣组成,这些火山渣落在靠近火山口的地面上。它们通常是由火山喷发形成的一个单一的开口,不像层火山或盾状火山可以在许多不同处开口。它们通常由成堆的熔岩团块或熔渣而不是火山灰构成。在火山喷发,熔岩团被吹向空中,破碎成小碎片从火山口周围坠落,形成了一个圆形(如乌兰察布市后旗的 3~6 号火山)或椭圆形(达里诺尔西部鸽子窝火山)的小火山。

火山熔岩锥(图 2d):呈侵入锥、丘状、钟状等,因为最初上部开口很容易被风化往往被忽略。是火山链中岩浆分异晚期产生相对黏稠的岩浆侵入而形成的,如:乌兰察布市后旗的 7 号和 8 号熔岩锥,

宁芜玢岩从梅山—吉山—牛首山—娘娘山,它们由北北东—南南西方向排列,明显地受地下岩浆房分异演化,由玄武安山质向粗面质过渡形成的火山链。当上部受到水体的淬火时容易形成火山熔岩锥(陶奎元,1994)。锥体主体是熔岩,在顶部和周围可以看到火山集块岩和火山角砾岩,如:大别山北麓、桐庐地区、河北省平泉县的骆驼峰、克什克腾旗达里诺尔火山群的蝼子山都是火山熔岩锥。后期的风化造成熔岩锥顶和侧面的火山碎屑岩部没有了,但是通过对周围喷发碎屑岩石的分布是可以判断和恢复火山锥的位置,尤其是当出现熔岩柱状节理的时候,基性岩浆侵入过程中,遇到水体淬火熔岩形成六方、五方、四方垂直向上的柱状节理(如:乌兰察布市前旗)。另外可以通过岩浆向上运动的痕迹来鉴别:如定向排列的矿物和颗粒大小的变化(如在熔岩锥的纵向上呈现上部细下部粗、边部的细中间粗,如:河北省平泉县骆驼峰)、流纹构造等。当没有水体淬火的情况下,火山岩浆以侵出方式形成球状体(bulbous)或熔岩穹丘(Lava Dome),如:马提尼克岛的 Mont Pelée (位于图 2a-I)。形成熔岩穹顶的岩浆在地下岩浆房内晶体早已结晶,因此“晶粥”黏度较大。

火山裂隙 (fissure vents):是一种容易被掩埋从而容易被忽略的火山喷溢形式,这主要是因为火山口被风化后破坏和被掩埋,如在锡林郭勒盟玄武岩

台地上毫无流出的裂隙,但是 1987 年冰岛的 Krafla 火山(位于图 2b-M)见裂隙喷涌出玄武质熔岩流(图 2h),所以这种裂隙形式的火山活动通常形成玄武质熔岩流台地或以中心溢流的盾形火山。世界最大的印度德干玄武熔岩流台地高原,厚达 2000 m,面积达 4220000 km²,晚白垩世形成,有观点认为是印度板块的快速分裂和大量玄武岩浆溢出。还有就是冰岛的 Laki 火山(位于图 2b-M),裂隙长约 25 km,熔岩流覆盖面积达 565 km²。

破火山口是描述一座火山爆发后又崩塌成为一个直径巨大的凹陷,如: Aleutian 岛链上 Aniakchak 火山口(图 2c,位于图 2a-G),3450 a 前形成,火山的持续活动使得原先的火山口塌陷成为一个 10 km 直径,口沿为 610 ~ 1341 m 深的圆形地质体。在坦桑尼亚的高原上 Ngorongoro 火山口(位于图 2b-O)的直径高达 19 km。这一火山口被认为是 2.50 Ma 前由一座大型火山形成的,在多次喷发后,火山锥向内塌陷。大型破火山口伴随有大体量的安山质一流纹质熔接凝灰岩层的形成。厄瓜多尔的加拉帕戈斯群岛 Chacana 破火山口,火山爆发后,气体的逃逸和后续岩浆供给的不足,导致破火山口持续性地塌陷(Neal et al., 2019; Shreve et al., 2019),目前地下岩浆仍然以非爆发的形式在活动(Galetto et al., 2019)。美国南部著名的 Valles 破火山口(35.87°N—106.57°W)分别在 1.7 和 1.2Ma 前 2 次爆发,最近一次活动在 50~60 ka 前。目前,地质科学研究破火山口主要在两个方面:①破火山口是否还在活动?美国政府地质地震研究机构一直在监测美国境内的黄石公园破火山口,估算在岩浆房中还有大约 20%~30%的熔浆还没有冷凝结晶;②形成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,破火山口位置往往控矿明显,目前已知矿化有 U、Mo、Li、Be、Sn、W 等。

2.2 按照火山的代表性以典型

火山地名或人名命名

常见的有 Hawaiian、Strombolian、Surtseya、Vulcanian、Plinian、Katmai、Maar(本文采用原文,中文有多种音译,仅 Vulcanian 就有伏尔加诺、瓦尔加诺、乌尔加诺,请读者对应)。

Hawaiian, 以夏威夷地区喷出的火山命名,代表玄武质宁静的爆发和溢流交替的火山形成过程。形成不高于 300m 的小型火山渣堆。中国内蒙锡林郭勒盟和乌兰察布市后旗所分布的小型锥形火山属这种类型,是 *VEI*(火山爆发指数, Volcanic Explosivity

Index)小于 1 的火山爆发;Strombolian, 以意大利西海岸火山命名,火山爆发形成熔岩和碎屑的混合锥体,溢流少爆发碎屑多,成分为玄武安山质,因黏度比夏威夷式大,熔岩流没有形成大面积的台地,Hawaiian 和 Strombolian 之间没有清晰的界线;Surtseyan, 以冰岛附近火山命名,以海底火山爆炸和涌流,海上水汽和火山灰喷射为特点;Vulcanian, 以西西里岛火山命名,由管形和岩墙形状控制中酸性岩浆运移,以初始爆发,释放水汽后岩浆堵塞通道结束;Plinian, 以火山观察时遇难的学者名字命名。岩浆成分为流纹质,黏度最大;Katmai, 以阿拉斯加火山命名,岩浆为流纹质、英安质、粗面质,爆发猛烈,溢流少;Maar, 以德国西埃菲尔地区居民对当地小型湖泊的称谓命名,包括射汽岩浆喷发(phreatomagmatic)带出新的岩浆碎屑,形成具有一定口沿高度的火山口、也包括含水量较高以射汽喷射方式(phreatic)形成完全负地形无口沿的火山口。

2.3 按照火山的爆发指数分类

用火山爆发指数(Volcanic Explosivity Index, *VEI*;Newhall and Self, 1982)来分类,以描述火山爆发的强度(图 3),从 0 至 8 级大致表示喷发火山喷发的体量(火山喷发体积, volume)和力度(火山喷发高度, column height)。体积的计算是用火山喷发期间产生的火山灰所堆积的体积来估算的,通过将火山灰沉积物的体积密度与构成火山灰的岩石类型的已知密度进行比较,对所研究火山灰体积进行孔隙空间校正。推算精确的 *VEI* 量值是一个挑战,快速及时地估算是根据已知火山喷发的高度和影响面积来比较辨别的,例如:研究活火山的 Cronin 教授认为 Tonga(汤加)火山是自 1991 年菲律宾 Pinatubo 火山爆发这 30 年以来最大的一次,但是 Tonga 火山爆发指数应当低于 Pinatubo (*VEI*=5)火山,可能在 *VEI*=4+和 5 之间。在实际计算中,当火山灰完全冷凝和压实后,尤其是对已固结的熔接凝灰岩计算较为接近实际情况,测算密度、折算比重、平均厚度计算、面积的测量。Yang et al. (2021)测量了长白山火山熔接凝灰熔岩(ignimbrites)的体量,演绎了 *VEI* 的计算,将长白山的 *VEI* 从 7 调降至 6(图 3)。

3 火山学研究的主要方面

3.1 活火山分布与板块活动

活火山(active volcano)是指近 10 ka 以内喷发

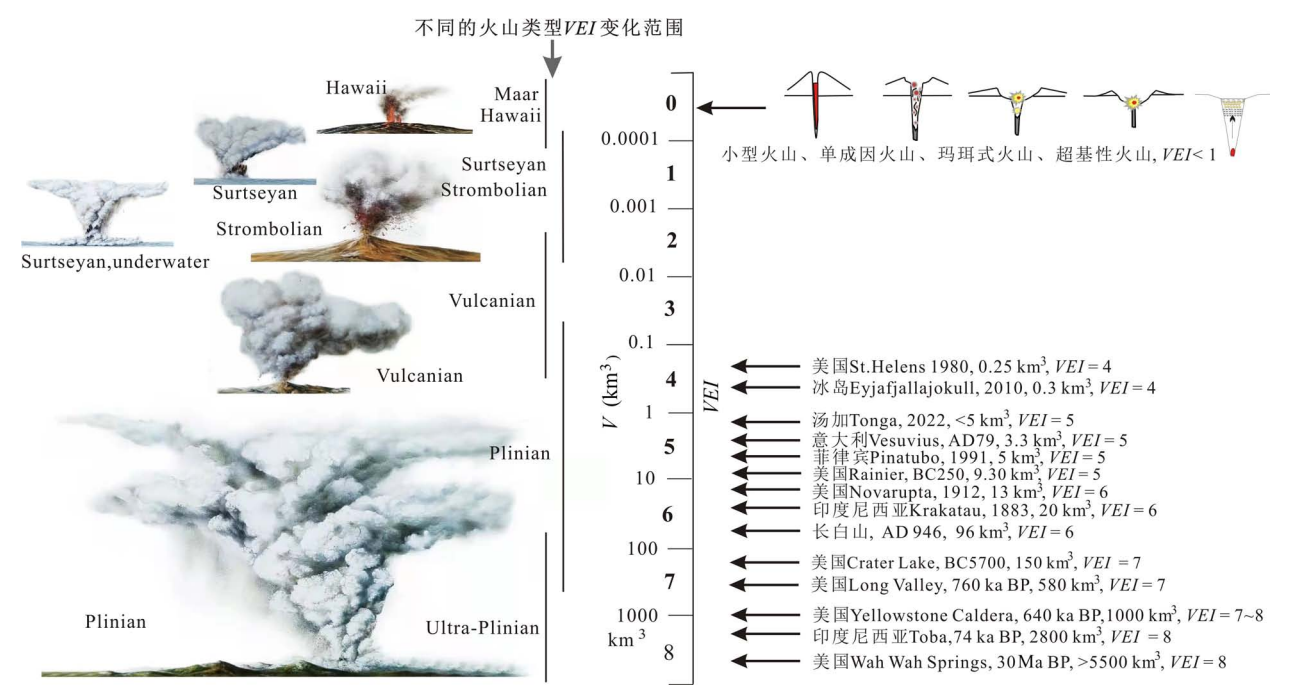


图 3 火山爆发类型、爆发指数范围、爆发指数标尺,世界典型火山 VEI 最近一次爆发时间和 VEI 值说明图

Fig. 3 The explanatory diagram of volcanic eruption types, their VEI range, the latest eruption time and VEI of some world's famous volcanoes (designed by the author)

VEI 是根据喷发物体积、火山灰的高度和持续时间对喷发进行评级的标尺。VEI = 1 级别的喷发产生 0.0001 到 0.001 km^3 的喷射物,金伯利岩—玛珥火山和以喷溢为主形成的盾形火山的 VEI 小于 1。VEI (0~8) 是对数尺度,在 VEI 1 以上,标度变为 10 的对数,这意味着标度中的每一步都代表着喷射的碎屑的混合量增加 10 倍。VEI 2 喷发产生 0.001 到 0.01 km^3 的喷射物。VEI 3 喷发产生 0.01 到 0.1 km^3 的喷射物。箭头所示,美国的 St. Helens 火山 VEI 为 4, Tango 火山 VEI 为 4+, 长白山火山的 VEI 为 6。超级火山是火山爆发力指数为 8 级和大于 8 的喷发。在地球历史上,可能有数次超过 VEI 为 8 的火山喷发。根据喷出物体积计算,超过 1000 km^3 的有 Yellowstone 火山、Long Valley 火山等,它们都是 VEI=8 的火山爆发。黄石国家公园坐落在直径约 80 km 的火山口内,目前以其间歇泉和温泉而闻名于世。这些热的特征是公园下方存在活跃岩浆系统的证据。这一火山—岩浆系统曾经产生过地球历史上最大的火山喷发

VEI is a scale for rating eruptions based on the volume of eruptions, the height and duration of volcanic ash. VEI 1 eruptions produce 0.0001 to 0.001 km^3 of ejecta, and the VEI of kimberlite Maar volcano and shield volcano mainly formed by overflow is less than 1. VEI (from 0 to 8) is a logarithmic scale. Above VEI 1, the scale becomes the logarithm of 10, which means that each step in the scale represents a 10-fold increase in the amount of materials ejected and sprayed. The VEI 2 eruption produced 0.001 to 0.01 km^3 of ejecta. The VEI 3 eruption produced 0.01 to 0.1 km^3 of ejecta. The VEI of St. Helens volcano is 4, Tonga volcano is 4+, and Changbai Mountain volcano is 6. Supervolcanoes are eruptions with VEI of 8 and greater. In Earth's history, there may be several eruptions with a VEI of more than 8. According to the volume of ejecta, Yellowstone Park volcano and the Long Valley volcano etc. are more than 1000 km^3 , which are volcanic eruptions with VEI = 8. Yellowstone National Park is located in a crater about 80 km in diameter. It is now famous for its geysers and hot springs. These thermal features are easy to observe evidence of an active magmatic system below the park, which volcanic—magmatic system produced the largest volcanic eruption in Earth's history

的火山, 10 ka 内没有喷发的是休眠火山 (dormant), 10 ka 内没有活动也没有任何迹象还可能活动的称之为死火山 (extinct volcano) (Acocella, 2021)。世界上目前有活火山 1350 座。火山在全球呈带状分布, 明显地与大地构造活动带有关 (图 2a、b), 它们集中在环太平洋构造带 (Ring of Fire, 位于图 2a-A—J)、太平洋中热点地区 (hot spots, 如夏威夷地区, 图 2a-K)、大西洋中脊上 (Spreading Ridges,

如: 大西洋中脊上的冰岛, 图 2b-M)、东非裂谷地区 (位于图 2b-O)。然而, 在大的板块分区中, 也存在许多小的板块, 形成“火山—构造”活动在时间上和威力上的差异, 所形成的火山地貌完全不一样, 如: 从海底喷发的世界上最大的活火山是夏威夷的 Mauna Loa 火山 (位于图 2a-K), 火山的侧翼都处于海底, 深度约在水下 5 km, 估算从洋底起的火山高度为 17 km。最近爆发的 Tango 火山位于新西兰的

东北方向,是太平洋火山环带的南缘(位于图 2a-A)。因为距离居民区近,一些活火山在世界上很有名:意大利的 Vesuvius 火山,印度尼西亚的 Tambora 火山,美加边境上的 Baker 火山,日本的 Fuji 火山。

火山在地球上的分布是有规律的,10 ka 间的 1350 座活火山呈条带、连续形成岛弧链,火山呈条带状分布与板块边界的偶合解释了火山岩浆的起因与板块运动密切相关,板块运动理论也完美地解释了火山的分布、火山岩浆成分与板块条带在横剖面位置的关系、不同板块边界具有完全不同的火山类型等。按照板块运动理论,有离散边界(divergent plate boundaries),边界中心以裂隙形式不断涌出新的岩浆,又称之为洋中脊玄武岩(Mid-Oceanic Ridge Basalt, MORB),如:南北延长 70000 km 的大西洋洋中脊火山北端——冰岛,产生的是以贫 K 和 Na 的拉斑玄武岩浆为主的基性火山岩,在这个位置上的喷发频繁(每百年数十次),*VEI* 小于 1;而聚敛边界(convergent plate boundaries)发生大洋板块俯冲呈楔形插进大陆板块下方,形成俯冲带(subduction zone),许多学者认为板块最初呈楔形俯冲到大陆板块下部,之后有可能在一定深度的水平方向继续移动,因而俯冲带的横剖面可以很宽。在横向上由俯冲带边部向大陆内部方向,有从英安质、安山质、碱性玄武岩(又称为:岛弧玄武岩(OIB, Ocean Island Basalts)位置上的有规律的变化。由于英安质和安山质岩浆的黏度大、流动性差,这种岩浆爆发都形成非常高的火山,*VEI* 大于 5。一些火山远离上述板块活动带,是特殊的热点(hot spots),被认为是板内(intraplate)局部的地幔柱所产生的,形成的火山成分以基性为主,岩浆来源深度较深,随着深部岩浆房的演化,这些热点地区的火山喷出的位置也在移动。

3.2 火山岩石学和地球化学

火山岩岩石学研究是研究火山的基础,这是因为古火山毕竟是大多数,火山学的认识和理论发展到现在就是根据“动”(活火山)的实际观察与“静”(古火山)的反演形成过程综合研究获得的。国际地科联火成岩分类委员会(IUGS)确立了全碱—氧化硅(TAS)的分类,建立了 17 个基本(root)的岩石名:basalt, basaltic andesite, andesite, dacite, rhyolite, alkali rhyolite, trachybasalt, trachyandesite, trachyte, alkali trachyte, picrobasalt, basanite, tephrite, phonotephrite, tephriphonolite, phonolite and foidite (Le Maitre, 1984)。李兆鼎等(1984)对火山岩的基本大类和变种进行了详细的描述,特别是对

斑晶和基质结构进行了图文并茂的详细说明,流纹岩细分为钙碱性流纹岩、碱性流纹岩、钾质流纹岩,英安岩分为流纹英安岩和英安岩,粗面岩分为粗面岩、碱性粗面岩、粗安岩,安山岩分为钙碱性安山岩、低铝安山岩、玄武安山岩,玄武岩有拉斑玄武岩、橄榄拉斑玄武岩、碱性玄武岩中有碱性橄榄玄武岩、粗面玄武岩、碱玄岩,响岩类有霞石响岩、白榴响岩,副长石岩有钾质白榴岩和钠质霞石岩,超镁铁质岩有苦橄岩、麦美奇岩、黄长岩。应当说,1985 年以前的火山岩石分类和特征研究为之后的火山岩石学、火山岩石地球化学、火山岩石微量元素和火山与板块构造的关系研究奠定了基础。

因多数火山岩中存在斑晶和基质,而基质中的矿物难以鉴定,加之不同的大地构造环境控制岩石化学特征明显,因此科学研究利用大数据投点制图制作了不同岩石分类图和不同构造环境下火山岩的辨别图(discrimination diagrams), $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{FeO}_t - \text{MgO}$ (AFM, Irvine and Baragar, 1971)用于区分拉斑和钙碱性系列, $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (A/CNK vs. A/NK; Shand, 1943)图,有效地区分:次铝花岗岩、过铝性花岗岩和过碱性花岗岩。 SiO_2 vs. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (TAS, Le Bas et al., 1986)图是最主要的用岩石常量化学分类图。 $\lg[w(\text{Zr})/10^{-6}] - \lg[w(\text{Zr})/w(\text{Y})]$ 图用于区分板内、岛弧、洋中脊玄武岩构造环境(Pearce and Norry, 1979)。将火山岩石化学成分计算出摩尔矿物投影到 QAPF 图中进行火山岩的命名(Streckeisen, 1980)。Peccerillo and Taylor (1976) $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图用于判别岛弧环境下的火山岩, $\text{Th} - \text{Co}$ 图(Hastie et al., 2007)作为补充,更灵敏地描述岛弧火山岩的特征。 $\text{Nb}/\text{Yb} - \text{Th}/\text{Yb}$ 和 $\text{Nb}/\text{Yb} - \text{TiO}_2/\text{Yb}$ 图(Pearce, 2008)反映出太古宙玄武质洋壳的特点。 La/Yb vs. Th/Nb 图(Hollocher et al., 2012)在研究尼泊尔片麻岩相中使用,是对太古宙地台研究的补充。Agrawal et al. (2008)基于 La 、 Sm 、 Yb 、 Nb vs. Th 的比值对数值 $\{\ln[w(\text{La})/w(\text{Th})], \ln[w(\text{Sm})/w(\text{Th})], \ln[w(\text{Yb})/w(\text{Th})], \ln[w(\text{Nb})/w(\text{Th})]\}$ 制作出超基性和基性岩石在不同构造环境下的区分图。镁铝石榴石中 $\text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 成分相关图和透辉石成分图区分含金伯利岩与其他金伯利岩和超基性岩等干扰岩石(丁毅和杨献忠, 2019)。

3.3 火山岩相学、古火山的恢复、火山矿产

“相”这个术语首先使用在沉积学的研究中,火

山岩相 (volcanic facies) 则是在陆表、湖泊、近海、深海火山爆发、喷溢环境下所形成岩石特征的总和。通过对现在火山岩的特征复原过去火山岩在什么环境下形成,这是火山岩相学研究的主要问题。

确定古火山口的位置,首先要用解析遥感数据手段确立火山口位置,进行野外各种火山机构和岩石的鉴别和制图 (mapping),对每一岩石带逐一划分,进而得出以火山口为中心的环形体。陶奎元 (2004) 系统地总结和阐述了各种火山岩相,喷溢、碎屑流、涌流、泥流、爆发塌陷、侵出、火山颈的特征。当火山口已经被风化得消失殆尽得时候,在一个地区通过火山相学的研究,进而寻找火山口的位置和与火山口有关的矿产。火山出现都是成群的,它们以弯曲的扇形或是呈直线链状排列的,形成在火山—构造盆地中,火山口位置与矿产明显相关。丁毅 (1992) 指出宁芜玢岩铁矿的铁来自闪长玢岩本身,后期 Na 化使得早期结晶的斑晶矿物甚至基质析出大量的 Fe 质,之后聚集形成铁矿,而 Na 化是岩浆在浅部岩浆房同化了三叠纪青龙群灰岩的结果,因此寻找 Fe 矿就等于寻找中基性岩与基底石灰岩耦合的地区。不同的岩性存在不同的矿产,如中酸性火山岩地区多存在 Cu 矿,而中基性火山分布区多存在 Fe 矿。火山机构在不同的深度上也存在矿种的分带性。

3.4 单成因火山研究

许多大型火山是在相当长的地质时期内经过多次喷发完成并且有成分上的变化,称之为“多成因火山 (polygenetic)”,而许多小型火山是在相对较短的地质时期一次或仅有几次喷发形成,称之为“单成因火山 (monogenetic volcano)”,单成因火山主要是基性火山群也有少量的酸性火山群形成的“单成因火山区 (monogenetic volcano field)”。单成因火山和多成因火山的分界是无法定量而精确区分的,但是,单成因火山岩浆的供给比较简单、直接和原始,即岩浆在地下深处起源到喷出地表过程中没有在中途停留形成较大的岩浆房,而多成因火山形成时在上地壳形成较大的岩浆房,岩浆经过结晶分异、同化混染、混合作用,因此多成因火山在成分上是有变化的,每次的喷发周期也长 (McGee and Smith, 2016)。单成因火山在全球有着广泛的分布 (Smith and Nemeth, 2017; Valentine and Connor, 2015)。

3.5 火山地震学

火山爆发前都有预兆,预兆是通过大地测量、地球物理、地球化学、地震监测各方面数据上的变化综

合得出的,其中地震的监测数据必不可少。通过对岩浆通道、火山口和侧面岩浆运移表现,发现在岩浆膨胀 (inflation) 导致地表变形 (deformation) 的过程中有地球化学 (释放气体,degas)、地球物理 (微重力、地震)、大地测量 (岩浆上拱或岩浆房膨胀所导致的地表变形) 等方面的异常现象。多学科多参数观察站 (WOVO, multi-parametric monitoring volcano observatories) 在全球各个地方建立 (<http://www.wovo.org>),从而人类初步掌握火山的活动。火山再度活跃往往发生在火山的一个侧翼,地震监测发现岩浆运移是以岩墙的方式在一侧进行的,最终可能会导致这个侧面的整体滑坡 (Carrasco-Nunez et al., 2006)。通过全球各地大量的裸露断面观察和实验研究共识:岩浆运移至近地表 < 10 km 的范围内的骚动 (magma unrest) 是以岩墙的形式运移 (dike propagation) 实现的 (Anderson et al., 2016; Kjoll et al., 2019; Urbani et al., 2018; Woods et al., 2019),岩浆或继续上侵或冷凝充填裂隙 (magma-filled fractures),以高角度突破、斜角度穿过、水平角度侵入形成岩墙、岩席、岩床。受到岩浆起源深度的影响,各种各样成分的岩浆含水量的不同所形成的岩浆向上的冲击力也不同,当遇到坚硬阻挡岩石地层时会产生地层断裂而导致地震,当遇到丰富地下含水层或阻挡层,岩浆产生水汽聚集能量到一定的程度时发生地下爆炸,或岩浆遇到石灰岩砂岩这样的弱阻挡层从而消耗岩浆的能量而就位,这两种情况都会导致岩浆运移终止 (dike arrest; Acocella, 2021)。

4 讨论

4.1 火山的 V_{VEI} 与火山的大小和主要爆发周期的关系

火山岩浆成分变化很大。统计和分析全球火山成分和相应的火山规模和 V_{VEI} 可以得出结论:超基性质包括金伯利质火山、玛珥式火山喷发的规模最小,V_{VEI} < 1,它们呈现地平或完全负地形火山口 (Blaikie et al. 2015),其次是基性火山口以小型火山为特征,如中国东北和内蒙古东部的新生代基性火山群,距离北京最近的是乌兰察布市后旗的乌兰哈达火山,8 座火山呈线性分布,明显地受到地下供给岩脉状通道控制 (dike feeder)。流纹质火山爆发形成的火山口 (Rhyolite Caldera Complex) 最大,晚期常常形成破火山口,V_{VEI} 也最大,喷发是最猛烈的一种。火山体积的大小和火山成分的规律显然与岩

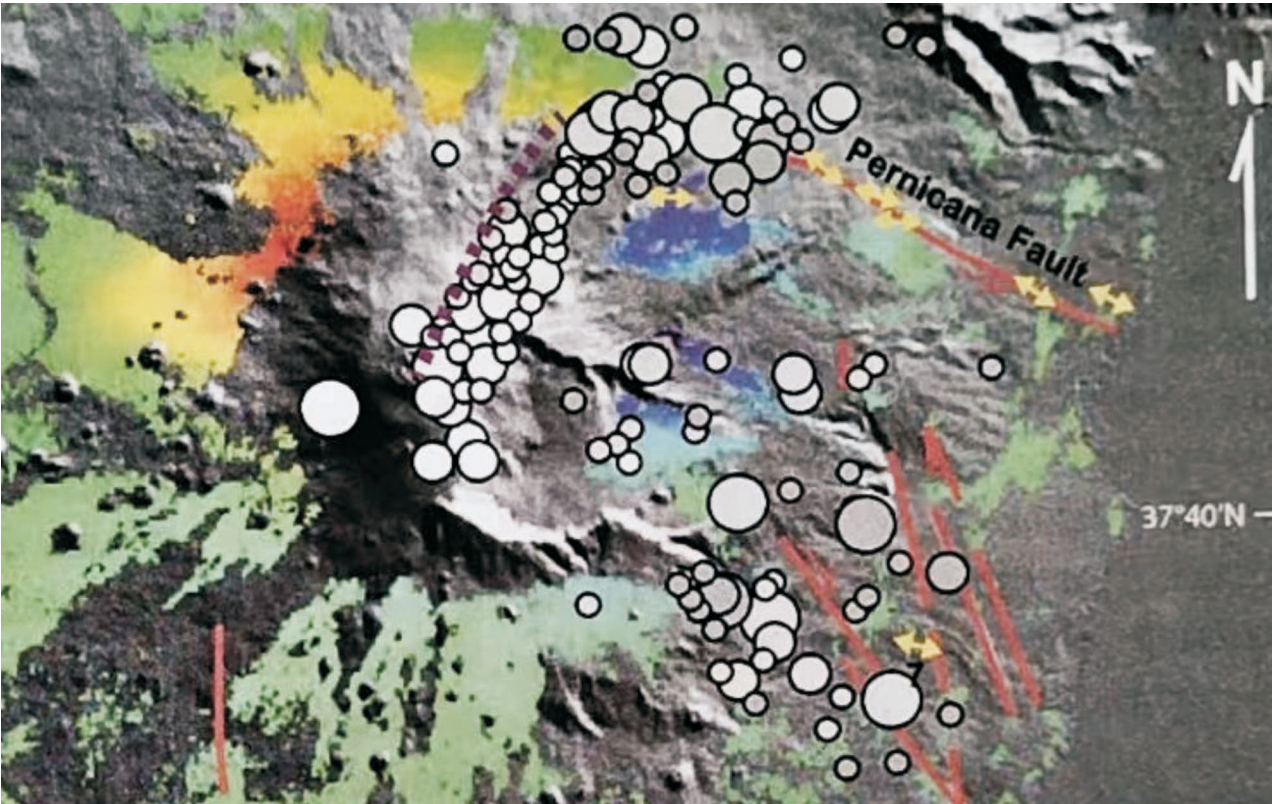


图 4 2002 年意大利 Mont Etna 火山地震监测图(Acocella, 2021)

Fig. 4 Seismic monitoring map of Mont Etna volcano in Italy in 2002 (Acocella, 2021)

2.5 至 4 震级的变化由小圈至大圈代表,颜色由浅到深代表时间由早至晚,由此得知导致火山侧翼地震是岩浆以岩墙形式运动而发生的

The magnitude of 2.5 to 4 varies from small circle to large circle, and the color from light to deep represents the time from early to late.

Therefore, it is known that the earthquake on the flank of the volcano is caused by the movement of magma in the form of dike

浆的黏度有关,酸性岩浆的黏度大形成的火山规模大、火山爆发的次数少(每万年一次)、但是危害最大。火山大的爆发周期之间虽然也有小的爆发,但是大的爆发周期是有规律的,例如:中朝边境上的长白山的 $VEI=6$,应当属于大型火山,其成分是过碱性流纹岩、粗面岩等,每万年左右应当大规模地喷发一次,有学者研究认为该火山喷发的时间应当更短些(Zou et al., 2010)。介于大型火山($VEI >6$)和小型火山($VEI <2$)之间的中型火山,例如 Tango 火山(位于图 2a-A 区)在公元 200、1100、2022 年分别爆发,差不多每千年一次(Acocella, 2021)。火山爆发的周期与火山原始岩浆成分之间的这种关系是因为不同的岩浆演化所需要的时间不同,再聚集能量而爆发的时间也不同,Acocella (2021) 归结是岩浆结晶分异的作用(fractional crystallization)的结果,是地下岩浆房 Al、Si、K、Na 等轻元素与 Fe、Mg 等重元素分开所需要的时间长短的结果。

4.2 活火山对地球生命的影响与监测

4.2.1 火山爆发对人类的直接伤害

意大利的 Vesuvius 火山(图 2c-N 区)是欧洲大陆非常著名的火山,公元前 79 年这一火山爆发造成 3360 人死亡,摧毁了许多罗马城市,最近的一次喷发是 1944 年。1783 年冰岛的 Laki 火山(位于图 2c-M 区)爆发所引发的食品短缺造成 9000 人死亡。1792 年日本的 Unzendake 火山(位于图 2c-F 区)爆发和引发的海啸造成 15000 人死亡。1815 年的印度尼西亚的 Tambora 火山(位于图 2c-C 区)爆发引起食品供应短缺造成 92000 人饿死。1883 年印度尼西亚的 Krakatau 火山(位于图 2c-C 区)喷发引发的海啸造成 36000 人伤亡。1902 年的法国在中美洲的马提尼克省的 Mont Pelee 火山(位于图 2c-I 区)爆发引发的碎屑流造成 29000 人伤亡。1985 年哥伦比亚的 Nevado del Ruiz 火山(位于图 2c-J 区)爆发形成的泥石流造成 25,000 人死亡。1991 年菲律宾的 Pinatubo 火山(位于图 2c-D 区)爆发造成 350 人死亡(Stovall et al., 2019)。

4.2.2 火山爆发影响气候

1991 年菲律宾的 Pinatubo 火山(位于图 2a-D 区)所喷发的火山灰有 15 Mt 的掺杂 SO₂ 粉尘混合物遮挡了半个地球,平均温度下降 0.5℃,影响天气数年。2022 年初 Tonga 火山(位于图 2a-A 区)也至少有 4 Mt 的 SO₂ 释放。有人类历史记录以来最猛烈的火山爆发是 1815 年的 Tambora 火山(位于图 2a-C 区),造成全球温度下降 3℃,还对次年的夏天温度产生了很大的影响。冰岛的 Laki 火山喷发出来的有害气体(F, S)弥漫整个欧洲长达 4 个月之久。北美航线经过阿拉斯加岛弧火山链的 Spurr 火山(位于图 2c-G 区)在 1992 年夏天爆发,产生的火山灰云多次严重扰乱了美国和加拿大的空中交通,火山灰使安克雷奇国际机场关闭了 20 h (Neal et al., 2022),火山灰云 4 d 之内飘到 5000 km 之外的加拿大大西洋海岸的哈利法克斯市。长白山火山口目前还由气体在喷出,其中含有 SO₂、CO₂、N₂、He、H₂、O₂ and CH₄(Fan et al., 2011)。

4.2.3 火山活动与地热梯度

科学研究公认在上地壳中,每个部位无论在横向和纵向的温度都是不一样的,造成差异的原因是 Moho 面在不同地区的与下地壳接触界限的深度不同和火山活动的分带性,研究地壳温度随深度的变化我们用地热梯度(geothermal gradient)来描述。地热梯度随着深度变化而改变,5 km 深度范围平均地热梯度为 25~30℃/km,而到达更深的范围,梯度会有变化,通常变为 14℃/km,而在火山活动地区增加到 200℃/km,如:肯尼亚裂谷。利用地热开展旅游、发电、提取有用元素等活动为人类造福(图 2g)。美国新墨西哥州的 Valles 破火山口(图 2a-H 区东部约 2500 km)内 2 km 之下有 260℃的热水,说明现在还有岩浆在地下活动,经过对该破火山口喷发历史研究,火山应平均每 50 ka 活动一次(Goff, 2009)。

4.2.4 火山监测

全新世火山与人类密切相关。在全新世活火山分布区,有必要开展全面调查,包括对火山锥体侧面松散的火山灰是否在暴雨过后形成火山泥流(lahars,图 1),山体侧的某一部位是否发生移动,地震发生的震级和频率,道路变形等。火山风险(volcanic risk)评估是一种半定量的对火山周围可能灾害的估算,这种分析可以用公式 Volcanic Risk = hazard × exposure × vulnerability (火山风险=危险×暴露×脆弱性)来评估,全球有 86 个国家约有 8 亿

人生活中的活火山直径 100 km 的范围内,集中在日本、东南亚的菲律宾和印度尼西亚、中美洲的墨西哥、危地马拉和尼加拉瓜。火山灾害事件调查从 AD1600 年至现在一共有 533 次,然而只有近 200 多年才有完整的记录(Acocella, 2021)。在 2015 年 Taogo 火山周围的珊瑚礁就被地下岩浆顶起,2022 年初爆发了(Allon, 2022)。地下岩浆以岩墙或通道侵入可以引起地下岩层和地表岩层的变形,导致地震的发生,通过对岩浆运动造成不同地下组成岩层的模拟变形或许能够增加我们对火山爆发前期岩浆运动的理解(Bonaccorso et al., 2017)。

4.3 火山与生物灭绝

地质学者都知道地质历史时期发生过五次生物大灭绝,其中只有最后一次证据最多:认为陨石曾经袭击地球,造成全球变冷导致统治 160 Ma 的恐龙在白垩纪末(65 Ma 前)灭绝,美国和墨西哥国边境的尤卡坦半岛 Chicxulub 陨石坑又被称为“恐龙陨石坑”,它的直径为 198 km (丁毅等, 2021)。然而,火山活动对全球气候的影响不可小觑,与陨石袭击地球同时形成的印度的德干高原(Deccan Plateau),在 69.5 Ma 到 62 Ma 前的火山活动形成熔岩复合体,部分地区达 10 个层理(约 1800m 厚),它们在较短时间内(< 1 Ma)喷发形成,释放的气体量(Cl、F、CO₂、SO₂等),形成 Deccan 熔岩台地,如此大规模的喷发肯定与对包括恐龙在内的生物群的大规模灭绝密切相关(Krishnamurthy, 2020)。

人们对有文明史期间爆发的火山有恐惧的印象,如:意大利的 Vesuvius 火山(公元 79 年喷发)、美国的 St. Helen's 火山(1980 年)、菲律宾的 Pinatubo 火山(1991 年)、冰岛国的 Laki 火山、日本的 Unzendake 火山、印度尼西亚的 Tambora 火山,因为这些火山爆发曾经对人类威胁很大,尤其到了通讯高度发达的今天,了解它们给人类文明的影响程度更高。但是,如果将它们与印度尼西亚的 Toba 古火山、美国的 Wah Wah Springs 古火山、美国的 Yellowstone 古火山的规模相比,就显得非常小了,这些古火山的 VEI 都大于 7 (图 3)。美国加州的 Long Valley 古火山大的更是让人恐惧,它是一个由 760 ka 前火山喷发造成的面积为 17×32km² 的洼地,凝灰岩面积约 600 km²,向南延申的更新世链状火山喷发中心,火山爆发的影响半径为 2000 km² (Bursik, 2009)。

5 展望

火山是地球深部能量释放的通道,人类阻止不

了。乌兰察布市玛珥式火山口群成因的研究(丁毅等, 2022) 揭示了富含地下水层消耗了岩浆的能量从而阻止了岩浆的喷出。世界各地大量的蝶状基性岩床证明了富含地下水的沉积岩层是岩浆的就位空间。在岩浆房上方的富含水的岩层阻止了火山的爆发, 这样的推理似乎应当打消全球居民对可能的黄石地下岩浆正在聚集能量再爆发而影响人类命运的恐慌, 而目前该地区地下岩浆正是遇到地下水而只有产生间歇泉(Geyser)的喷射证明了地下岩浆的能量正在被地下水所消耗。

在监测活火山方面, 人类所能做到的:

(1) 减少火山爆发对人类的伤害包括炙热岩浆直接伤害、有害气体、影响航空飞行、火山灰和酸雨、泥石流等, 建立监测、预警、疏散居民等所形成的完整的体系;

(2) 释放气体的成分直接反映地下岩浆的活动(Pering et al., 2019), 活火山气体释放(degassing)的不断监测以保证人类安全, 中国活火山有五大连池、长白山(刘若新等, 1999), 这些位置的地下岩浆房内还有多少岩浆没有冷凝, 是否岩浆还在进行分异, 从而有可能导致火山再度爆发? 中国的大同火山群被认为是在 200 ka 年前结束喷发了, 但是在 1989、1991、1999、2008、2010 年这一地区发生了地震, 精准定位震源的位置(经纬度和深度)有助于研究诱发地震的原因, 是岩浆活动的结果还是其他原因所至, 不能一味地归为断层活动或是板块运动造成的。

多数学者共识, 火山岩浆的喷出是岩浆通过地下以岩墙或以岩管形状为通道运移到地表的结果。而岩浆运移受到上地壳不同岩层的控制, 岩浆或同化矿物组成晶格能低的灰岩而继续上侵、或遇到丰富的含水层呈岩床就位而就此止步, 这些的差异导致了一个地区的与火山有关的矿产、火山是否喷发等等一系列的表现。

五大连池、腾冲、龙岗、阿尔山、阿巴嘎、阿什库勒等地区都有基性火山群分布, 它们是单成因火山还是每个火山群有随着时间演化在成分上的变化? 一个地区的单成因火山与另外一个地区单成因火山在时间上和构造位置上有什么不同? 一系列的单成因火山田揭示了怎样的大地构造环境和演化? 等等的许多问题有待系统地深入研究。

Acocella (2021) 认为火山—构造(Volcano—Tectonics)是未来火山学研究的最主要的方向, 希望通过火山的研究揭示地球构造过去的历史和打造

现在监测的理论基础。中朝边境上的长白山距离太平洋板块聚敛边界有 2500 km, 按照板块与不同类型火山分布的规律, 这个位置出现英安质—粗安质—粗面质火山的喷发属于世界上的特例。长白山火山远离聚敛板块边界恰恰与美国南部的 Valles 破火山口远离聚敛边界类似。深入地进行对比研究有助于进一步揭示板块运动与火山喷发的关系。

VEI 高于 7 的火山活动影响全球气候从而破坏地球的生命演化。发现中国大的古火山是在区域地质资料的基础上, 中国已经完成了各省的区域地质志的编撰工作, 加上遥感解析、野外调查、无人机观察、分析计算等工作, 通过论证而发现大型古火山是完全有可能的。期待中国学者在这方面研究为世界做出贡献。

致谢: 感谢审稿专家的修改、补充意见。本文作者 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鼎先生的怀念, 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, 吴文盛, 刘文革, 侯征, 任小华, 唐宗源. 2022. 内蒙古辉腾锡勒玛珥式火山口群特征与成因. 地质学报, 96(4): 1215~1224; DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021250.

丁毅, 1992. 宁芜岩铁矿成因新论: 同化作用、高侵位和铁质聚合. 矿床地质, 11(3): 195~202; DOI: 10.16111/j.0258-7106.1992.03.001

丁毅, 吴云霞, 李继成, 郝志平, 戴涛杰. 2019. 内蒙古资县玛珥式火山口群的发现和意义. 地质论评, 65(6): 1431~1434; DOI: 10.16509/j.georeview.2019.06.010

丁毅, 侯征, 吴云霞. 2021. 世界陨石坑研究. 地质论评, 67(4): 1095~1104; DOI: 10.16509/j.georeview.2021.06.045

丁毅, 杨献忠. 2019. 沉积物中重矿物 KIM 的找矿方法和意义. 地质找矿论丛, 34(3): 453~459; DOI: 10.16509/j.issn.1001-1412.2019.03.016

李兆鼎, 王碧香, 王富宝, 王松产, 费文恒. 1984. 火山岩的分类命名和鉴定特征. 中国地质科学院地质研究所所刊, 第 8 号(特刊): 1~97.

刘嘉麒. 1999. 中国火山. 北京: 科学出版社.

刘若新, 樊祺诚, 魏海泉, 李霓. 1999. 中国活火山研究. 地质论评, 45(增刊): 3~15.

陶奎元. 1994. 火山岩相构造学. 南京: 江苏科学技术出版社: 32~131.

Agrawal S, Guevara M, Verma S, 2008. Tectonic discrimination of basic and ultrabasic volcanic rocks through log-transformed ratios of immobile trace elements. International Geology Review 50: 1057~1079.

Allon C. 2022. Hunga Tonga Eruption Likely A Small Vei 5, Cooling Implications Explained. Retrived from <https://electroverse.net/>

- hunga-tonga-eruption-small-vei-5-cooling-implications-explained/ on 2022-02-22.
- Acocella V. 2021. *Volcano—Tectonic Process*. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 1~31.
- Anderson M, Almqvist B S G, Burchart S, Troll V R, Malehmir A, Snowball I, Kubler L. 2016. Magma transport in sheet intrusions of the Alno carbonatite complex, central Sweden. *Sci. Rep.* 6, 27635. DOI: 10.1038/srep27635.
- Blaikie T N, Van-Otterloo J, Ailleres L, Betts P G, Cas R A F. 2015. The erupted volumes of tephra from maar volcanoes and estimates of their *VEI* magnitude: examples from the late Cenozoic Newer Volcanics Province, south-eastern Australia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301: 81~89; <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores>.
- Blundy J, Afanasyev A, Melnik O, Tattitch B, Sparks RSJ, Utkin I. 2021. The economic potential of copper-bearing sub-volcanic brines. *Royal Soc Open Sci* 8:202192
- Bonaccorso A, Aoki Y, Rivalta E. 2017. Dike propagation energy balance from deformation modelling and seismic release. *Geophys. Res. Lett.*, 44: 5486~5494.
- Bursik M. 2009. A general model for tectonic control of magmatism: Examples from Long Valley Caldera (USA) and El Chichón (México). *Geofísica Internacional* 48(1): 171~183.
- Burchardt S. 2018. Introduction to volcanic and igneous plumbing systems — developing a discipline and common concepts. In: Burchardt S. ed. *Volcanic and Igneous Plumbing System*. Uppsala, Sweden: Elsevier Inc.; 1~12.
- Carrasco-Nunez G, Diaz-Castellon R, Siebert L, Hubard B, Sheridan M F, Rodriguez S R. 2006. Multiple edifice—collapse events in the Eastern Mexican Volcanic Belt: the role of sloping substrate and implications for hazard assessment. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 158: 151~176.
- De Moor J M, Aiuppa A, Pacheco J, Avaré G, Kern C, Liuzzo M, Martínez M, Giudice G and Fischer T P. 2016. Short-period volcanic gas precursors to phreatic eruptions; insights from Poás Volcano, Costa Rica. *Earth and Planetary Science Letters*, 442: 218~227; doi:10.1016/j.epsl.2016.02.056
- Decker B B. 2020. Volcano. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/volcano> on 2020-12-15.
- Ding Yi. 1992&. A new discussion on the genesis of Ningwu porphyry iron ore; assimilation, high emplacement and iron aggregation. *Mineral deposit*, 11(3): 195~202; DOI:10.16111/j.0258-7106.1992.03.001
- Ding Yi, Wu Wensheng, Liu Wenzhuo, Hou Zheng, Tang Zongyuan, Ren Xiaohua. 2022&. Characteristics and genesis of Maar craters in Huitengxile, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 96(4): 1215~1224.
- Ding Yi, Wu Yunxia, Li Jicheng, Hao Zhiping, Dai Taojie. 2019&. Discovery and significance of Maar crater group in Zhuozhi County, Inner Mongolia. *Geological Review*, 65(6): 1431~1434; DOI: 10.16509/j.georeview. 2019.06.010
- Ding Yi, Hou Zheng, Wu Yunxia. 2021&. World Impact Caters. *Geological Review*, 67(4): 1095~1104; DOI: 10.16509/j.georeview. 2021.06.045
- Ding Yi, Yang Xianzhong. 2019&. Prospecting methods and significance of KIM in sediments. Contributions to geology and mineral resource research, 34(3): 453~459; DOI: 10.16509/j.issn.1001-1412.2019.03.016
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Zhao Yongwei, Li Ni, Sun Jianli. 2011. Recent progress in active volcanoes in China, in China National Report on Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, for the 25th General Assembly of IUGG, Melbourne, Australia, 28 June-7 July 2011 [prepared by the Chinese National Committee for the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI)]; 15~18.
- Galettto F, Bagnardi M, Acocella V, Hooper A. 2019. Noneruptive unrest at the caldera of Alcedo Volcano (Galapagos Islands) revealed by InSAR data and geodetic modeling. *J. Geophys. Res.*, 124; <https://doi.org/10.1029/2018JB017103>.
- Goff Fraser. 2009. *Valles Caldera — A Geologic History*. New Mexico, USA: University of New Mexico Press.
- Grütter H S, Gurney J J, Menzies A H, Winter F. 2004. An updated classification scheme for mantle derived garnet, for use by diamond explorers. *Lithos*, 77: 841~857.
- Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, Mitchell S F. 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th—Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48: 2341~2357.
- Hollocher K, Robinson P, Walsh E, Roberts D. 2012. Geochemistry of amphibolite-facies volcanics and gabbros of the storen Nappe in extensions west and southwest of Trondheim, western gneiss region, Norway: A key to correlations and paleotectonic settings. *American Journal of Science*, 312: 357~416.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8: 523~548.
- Jolly A D, Jousset P, Lyons J J, Carniel R, Fournier N, Fry B, Miller C. 2014. Seismo-acoustic evidence for an avalanche driven phreatic eruption through a beheaded hydrothermal system: An example from the 2012 Tongariro eruption; *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286: 331~347; doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.04.007
- Kjoll H J, Galland O, Labrousse L, Andersen T B. 2019. Emplacement mechanisms of a kyke swarm across the brittle—ductile transition and the geodynamic implications for magma-rich margins. *Earth Planet. Sci. Letter*, 518: 223~234.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali—silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745~750.
- Le Maitre R W. 1984. A proposal by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram. *Australian Journal of Earth Sciences*, 31(2): 243~255; DOI: 10.1080/08120098408729295
- Li Zhaonai, Wang Bixiang, Wang Fubao, Wang Songchan, Fei Wenheng. 1984&. Classification, nomenclature and identification characteristics of volcanic rocks. *Journal of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, No. 8 (Special Issue): 1~97.
- Liu Jiaqi, 1999&. *Volcanoes in China*. Beijing: Beijing Science Press.
- Liu Ruoxin, Fan Qicheng, Wei Haiquan, Li Ni. 1999&. Research on active volcanoes in China. *Geological Review*, 45:3~15.
- Krishnamurthy P. 2020. The Deccan Volcanic Province (DVP), India: A review. *Journal of the Geological Society of India*; DOI: 10.1007/s12594-020-1521-1.
- McGee L E, Smith I E M. 2016. Interpreting chemical composition of

small-scale basaltic system; a review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 325: 45~60.

Neal C A, Brantley S R, Antolik L, Babb J L, Burgess M, Calles K. 2019. The 2018 rift eruption and summit collapse of Kilauea Volcano. *Science*, 363: 367~374.

Neal C A, Casadevall T J, Miller T P, Hendley II J W. , and Stauffer P H. 2022. Volcanic Ash——Danger to Aircraft in the North Pacific. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/fs//fs030-97/> on 2022-02-11

Newhall C G, Self S. 1982. The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, 87: 1231~1238.

Papale P, Garg D. 2022. Big volcano science: Needs and perspectives. *Bulletin of Volcanology* (2022), 84: 20; <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01524-0>

Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100: 14~48.

Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69:33~47.

Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, northern Turkey. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81; <http://dx.doi.org/10.1007/BF00384745>

Pering T D, Tehnuka I, Liu E. 2019. Periodicity in volcanic gas plumes: A review and analysis. *Geosciences (Switzerland)*, 9(9): 394; DOI:10.3390/geosciences9090394

Ross P S, Bedard L P. 2009. Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46: 823~839.

Shand S J. 1943. Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification and Their Relation to Ore-deposits with a Chapter on Meteorite. New York: John Wiley and Sons.

Shreve T, Grandin R, Boichu M, Garaebiti E, Moussalam Y, Ballu V. 2019. From prodigious volcanic degassing to caldera subsidence and quiescence at Ambrym (Vanuatu): the influence of regional tectonics. *Scientific Reports*, 9(1):18868; <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55141-7>

Smith I E M and Nemeth K. 2017. Source to surface model of monogenetic volcanism: a critical review. In: Nemeth K, Carrasco-Nunez G, Aranda-Gomez J J, Smith I E M. eds. *Monogenetic Volcanism. Special Publications of Geological Society, London*, 446: 1~28.

Stovall W K, Driedger C L, Westby E G, Faust L M. 2019. Living with volcano hazards. U. S. Geological Survey Fact Sheet 2018-3075: 6; <https://doi.org/10.3133/fs20183075>

Streckeisen A. 1980. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. *Geol. Rundsch.*, 69: 194~207; <https://doi.org/10.1007/BF01869032>

Tao Kuiyuan. 1994#. *Volcanic Lithofacies Tectonics*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press:32~131.

Urbani S, Acocella V, Rivalta E. 2018. What drives the lateral versus vertical propagation of dikes? Insights from analogue models. *J. Geophys. Res.*; 123; <https://doi.org/10.1029/2017JB015376>

Valentine G A, Connor C B. 2015. Basaltic volcanic fields. In: Sigurdsson H, Houghton B, Mc Nutt S R, Rymer H. Stix J. eds. *The Encyclopedia of Volcanoes: 2nd edition*. San Diego: Academic Press: 423~439.

Van Rose S, Mercer I. 1991. *Volcanoes*. Harvard, England: Gardners Books: 1~61.

Woods J, Winder T, White R S, Bransdottir B. 2019. Evolution of a lateral dike intrusion revealed by relatively-relocated dike-induced earthquakes; the 2014~15 Bardarbunga—Holuhraun rifting event, Iceland. *Earth Planet. Sci. Letter*, 506:53~63.

Yamaoka K, Geshi N, Hashimoto T, Ingebritsen S E, Oikawa T. 2016. Special issue “The phreatic eruption of Mt. Ontake volcano in 2014”: *Earth, Planets, and Space*, 68; doi:10.1186/s40623-016-0548-4

Yang Qingyuan, Jenkins S, Lerner G, Li Weiran, Suzuki T, McLean D, Derkachev A N, Utkin I V, Wei Haiquan, Xu Jiandong. 2021. The Millennium Eruption of Changbaishan Tianchi Volcano is VEI 6, not 7. *Bull. Volcanol.* 83 (11): 74; <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01487-8>

Zou Haibo, Fan Qicheng, Zhang Hongfu. 2010. Rapid development of the great Millennium eruption of Changbaishan (Tianchi) Volcano, China/North Korea: Evidence from U—Th zircon dating. *Lithos*, 119 (3~4): 289~296; <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.006>

A review on volcanology

DING Yi^{1,2)}

- 1) College of Interdisciplinary of Hebei GEO University, Shijiazhuang, 050022;
- 2) Institute of Geological Surveys of Hebei GEO University, Shijiazhuang, 050031

Abstract:Great progress has been made in volcanology. This paper summarizes the achievements in various aspects of volcanology in global research in recent years, including new understanding of the basic concept of volcanoes, volcanic constructions, various classifications on volcanoes, volcanic petrology and geochemistry, volcanic petrography, volcanic eruption index for evaluating the size of volcanic eruption, classification of rocks and geochemistry, discrimination diagrams of various major and trace elements, the relationship between the distribution of active volcanoes and plate tectonic theory. The disasters and benefits brought by active volcanoes to mankind,

the monitoring of active volcanoes, the past volcanic activities on biological destruction, the research of monogenic volcanoes, etc. Volcanic ~ tectonics is a direction of volcanology research in the future. Through the study of the relationship between volcanoes and tectonics, we can reveal the distribution of volcanoes and the evolution of the earth. The magma ejected by volcano is the result of propagation to the surface in the form of dike or pipe. The location of Changbai Mountain on the border between China and North Korea is a special case, which should be worthy of in-depth study. There are many Cenozoic volcanoes distributed in China. Whether they are monogenic volcanoes, these volcanoes have evolution regulation in compositions, and the relationship between their distribution and geotectonic need to be deeply and systematically studied.

Keywords: volcano; volcanology; volcano constructions; volcanic explosivity index; plate tectonics; volcano monitoring

The author: DING Yi, male, born in 197, professor, research on volcano, maar—kimberlitic diatreme and meteorite crater et al. ; Email: chinakimberlite@126.com; vwsourc@ hotmail.com

Manuscript received on: 2022-03-22; Accepted on: 2022-05-11; Network published on: 2022-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.05.085 **Edited by:** ZHANG Yuxu

