



聂保锋，首都师范大学资源环境与旅游学院讲师，矿物学、岩石学、矿床学专业博士。2009年毕业于中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，现主要从事火山学、岩石学、岩浆深部过程的研究工作。近年来先后主持国家自然科学基金青年基金、北京市自然科学基金、北京市教委科研项目3项，参与国家自然科学基金、北京市自然科学基金和中国地调局重点成矿区带地质矿产调查评价项目等5项。发表学术论文10余篇；参编著作2部。

火山末日

聂保锋 郭佳欢 刘永顺 魏海泉 彭年

“……好像关在一个密不通风的黑房里那样一片漆黑，只听到妇女低沉悲泣、孩子尖声哭叫和男人大声呼喊。有人呼唤父母，有人呼唤儿女，有人叫喊妻子……许多人向天举起双手，求神保佑，但大多数人都知道，世上不再有神，这无尽的黑夜就是世界末日……”。小普利尼（Pliny the Younger）亲历公元79年8月24日意大利维苏威（Vesuvius）火山爆发，用细腻的文字记录了这恐怖的火山末日。

“末日”一词源于宗教教义。然而，在宗教产生之前，火山末日已在地球上反复上演。不知道多少生命的脉搏在火山灰下由鲜活的跳动变成永恒的静止，不知道多少文明在炽热的岩浆下消失殆尽。火山犹如地球上最具活力的巨人，主宰着地球上生命毁灭与新生的宏伟历史剧反复上演。

本文简要介绍了显生宙五次生物大灭绝事件与火山大爆发的关系，探讨了全新世以来火山爆发对人类文明和生物生存环境的冲击，分析并展望了超级火山大爆发对人类文明可持续发展的潜在危险。

火山大爆发与生物大灭绝

（一）五次生物大灭绝事件

寒武纪生命大爆发以来的近5亿年中，地球上先后出现过五次毁灭性的生物灭绝事件，导致大规模生物物种的消失，在地质上通常称为“大灭绝”（Mass extinction event）。五次大灭绝分别发生在奥陶纪末、泥盆纪末、二叠纪末、三叠纪末和白垩纪末，毁灭物种平均超过40%，高

的达 80% 以上的物种被彻底毁灭。在这期间，也发生过规模较小的生物灭绝事件 80 余次，毁灭物种平均在 10% ~ 15%，一般局限在更小一级的地理单元，为便于分析，这里分别称为一级、二级……灭绝事件。

这些级别不一的毁灭性灾害事件序列，塑造并记录了地球生命演化的轨迹。犹如西方早期博物学家对“上帝创造了万物，为何又把它们彻底地毁灭”的沉思和对问题的执着追求一样，什么原因导致地球生物大灭绝，也就成为地球科学和生命演化领域的一个核心问题。

1. 奥陶纪末大灭绝：这是地球发生的第一次生物大灭绝事件。大规模的火山喷发在地球平流层中形成硫酸盐气溶胶，硫酸盐气溶胶具有浓度高、低反射性特征，导致全球性降温。这一快速的气候变化引发了海洋生物大规模灭绝，接近 80%

的海洋生物在奥陶纪末消失，主要有三叶虫、直角石、腕足类、笔石、海百合等（图 1.A.D.G）。

2. 泥盆纪末大灭绝：泥盆纪生物物种开始分化，具有水、陆两栖的特点，被称为“鱼类的时代”。以西伯利亚大陆性溢流玄武岩为代表，3.72 亿年前全球性的地幔柱火山喷发形成的大规模的熔岩流和喷发气体促发了泥盆纪末大灭绝，海洋生物被重创，泥盆纪丰富的珊瑚礁生态系统被毁灭，大量海绵、腕足类和无颌纲动物遭毁灭，海蝎和盾皮鱼彻底灭绝（图 1.B.C）。大灭绝的最晚期是弗拉斯—法门期（Frasnian—Famennian）全球性生物绝灭事件（简称 F—F 事件），约 80% 的地球生物被毁灭。

3. 二叠纪末大灭绝：灭绝事件出现在 2.5 亿年前，是地球历史上最大规模的大灭绝，持续 6 万年之久。由最大规模

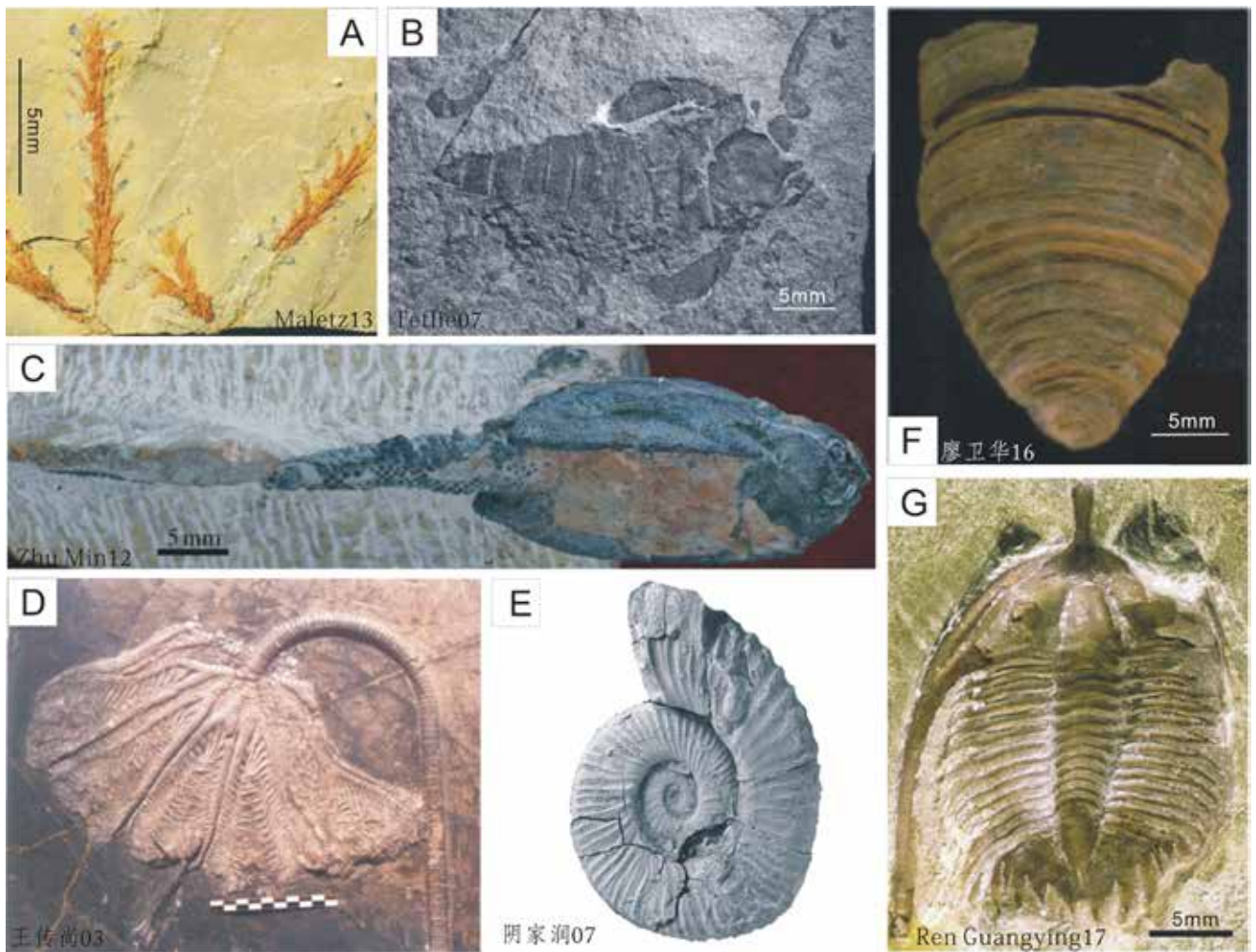


图1 灭绝的海洋动物化石

A. 早奥陶世笔石（湖北宜昌）；B. 志留纪板足鲎（海蝎）（湖南龙山）；C. 早泥盆世盾皮鱼（云南）；D. 晚三叠世海百合（贵州关岭）；E. 早侏罗世菊石（西藏隆子）；F. 早泥盆世四射珊瑚（云南昭通）；G. 晚寒武世三叶虫（山东临沂）

的西伯利亚暗色岩（Siberian Traps）喷发引起，喷出的岩浆覆盖面积达 700 万平方千米，大量温室气体喷发到大气当中，给地球环境带来大浩劫。这一喷发也导致大规模的酸雨，90% 的海洋物种如海百合、三叶虫、四射珊瑚等灭绝（图 1.D.F.G），75% 的陆地生物被彻底毁灭。

4. 三叠纪末大灭绝：在五次大灭绝中规模最小的一次，仅有 20% 的海洋和陆地生物被毁灭，大部分物种延续到侏罗纪和白垩纪。

5. 白垩纪末大灭绝：最著名的大灭绝事件，通常被称作“KT 事件”，由印度德干高原大规模玄武岩溢流喷发和陨石撞击墨西哥湾的犹加敦半岛的共同影响，大量的灰尘和火山气体笼罩地球表层数年之久，引起全球性气候的剧烈变化。超过 70% 的海洋生物和 15% 的陆地生物被彻底毁灭。实际上，超过一半的陆地动物灭亡，几乎所有的恐龙在这次大灭绝中丧生（图 2）。起源于恐龙的现代鸟类是动物中为数不多的幸存者之一。海洋生物中的菊石、箭石和大型的蛇颈龙等爬行类也被彻底毁灭。

（二）大灭绝事件的成因

全球性的大灭绝事件的成因，长期存在争议。有的认为全球性大灭绝事件与大规模火山爆发引起的全球性气候变化

有关，有的倾向于行星撞击，也有研究认为大灭绝是由火山喷发和行星撞击共同引起。随着研究的不断深入，可利用的生物化石、大灭绝、行星撞击事件和大规模火山喷发的数据库逐渐建立起来，特别是地球化学、测年技术和大数据技术的快速进步，使这一问题逐渐得到解决。

大量的数据对比表明，奥陶纪末、泥盆纪末、二叠纪末、三叠纪末四次大灭绝与地球上大规模火山喷发、全球性气候变化、海平面升降具有明显的一致性。而且古火山喷发和五次小规模二级生物灭绝事件也有一致规律。大规模火山爆发的时间和全球性生物大灭绝、大洋缺氧事件表现出很好的相关性（图 3）。而且结果也显示火山喷发规模和大灭绝的物种灭绝量也有一定的关联，二叠纪末和白垩纪末全球性地幔柱大规模大陆溢流喷发分别对应了两次最大规模的生物灭绝事件。除了导致白垩纪末恐龙大灭绝的大规模火山喷发和墨西哥犹加敦希克苏鲁伯陨石撞击事件表现出同步性外，其他主要的行星撞击事件和大规模火山喷发之间不具有直接联系，这揭示了大规模火山喷发并不是由行星撞击触发的。对墨西哥犹加敦希克苏鲁伯陨石撞击事件（145km 陨石坑）的研究表明，撞击事件在时间上早于白垩纪末生物大灭绝 30 万年，并且撞击本身并未引起明显生物灭绝事件。这表明陨石直径

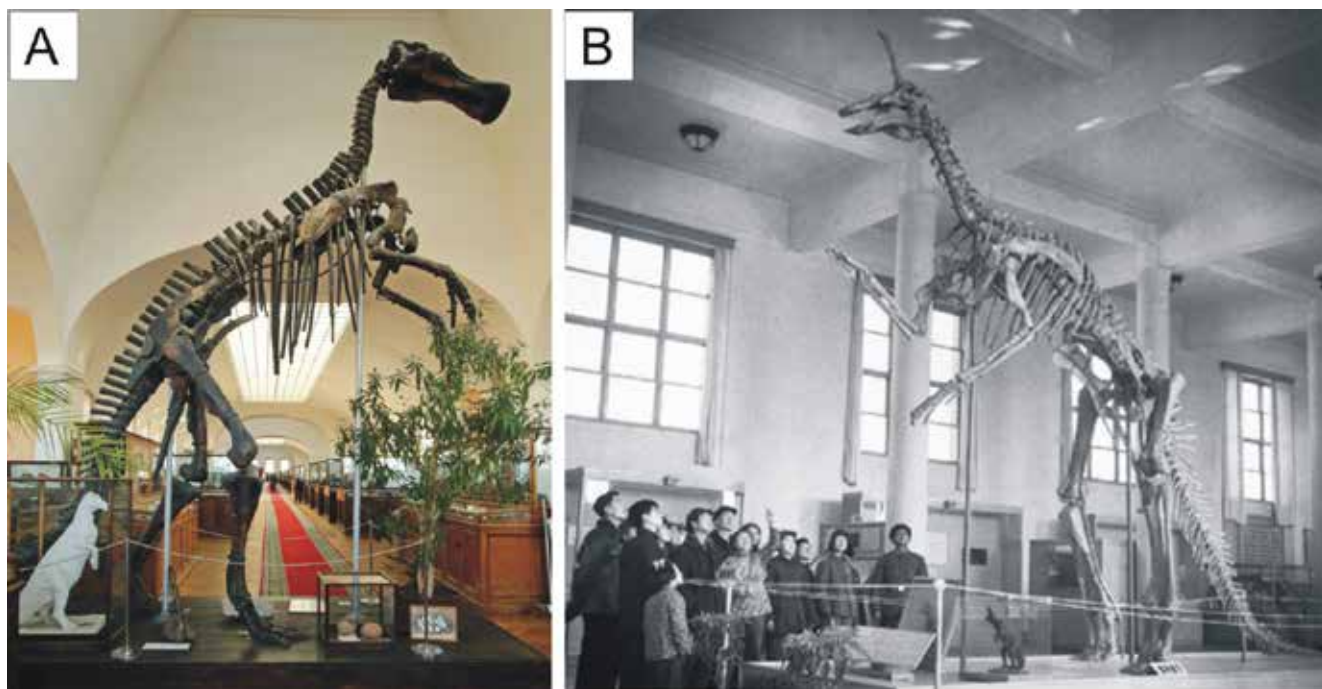


图2 白垩纪末灭绝的恐龙化石

A. 中国出土的第一具较完整的恐龙骨架化石（苏联地质学家发掘于黑龙江嘉荫县，现藏于圣彼得堡博物馆）

B. 中国科学家发掘的第一具较完整的恐龙骨架化石（杨钟健组织发掘于山东莱阳）

火山大爆发下的人类文明

(一) 火山与消失的古代文明

全新世以来，人类登上地球生命演化的舞台，开启了人类文明的新时代。分布在活火山周边的早期文明中心有地中海盆地、墨西哥和中美洲的中部盆地、日本岛和东南亚岛屿等。

地中海盆地是火山喷发对人类文明影响最突出的地区之一。地中海是欧洲文明发源地，也是欧洲最具代表性的活火山聚集地。伴随着火山喷发的交替进行，文明也在流转演进，从尼安德特到现代智人，古埃及 - 米诺斯 - 迈锡尼 - 古希腊 - 古罗马 - 拜占庭不断更替。研究表明，距今 3.7 万年前的意大利坎帕尼亚伊格尼姆岩大爆发 (Campanian Ignimbrite eruption) 毁灭了欧洲早期的尼安德特文明。火山大爆发数据和尼罗河水文变化记录的研究，揭示由于火山大爆发导致尼罗河定期泛滥异常，区域性干旱引发农业危机和社会动荡，导致托勒密王朝 (公元前 305-30 年) 的衰败和灭亡。

希腊桑托里尼岛锡拉火山 (Santorini, Thera volcano) 公元前 16 世纪米诺斯大爆发是过去 4000 年来最大规模的火山喷发之一。在米诺斯大爆发前，桑托里尼已经存在一个新月形破火山口，桑托里尼岛早期的名字 “Stronghyle” 即源于此 (图 4)。米诺斯大爆发摧毁了东地中海的大部分地区，喷发分为多个阶段，主喷发阶段主要是岩浆蒸汽喷发，喷出的火山灰覆盖了桑托里尼岛的东部和安纳托利亚的大部分地区，接着喷出 5-7.5 立方英里的岩浆和 12.5-19 立方英里的火山碎屑物质。大爆发引起大范围农业歉收和全球性气候变化。火山浮岩覆盖了整个地中海，喷发引起的海啸摧毁了地中海大部分地区的文明，阿克罗蒂里 (Akrotiri) 被空降火山灰和火山碎屑物掩埋，考古发掘使之成为又一个庞贝古城 (图 5、图 6)，大爆发摧毁了爱琴海青铜时代的米诺斯文明。米诺斯大爆发再次形成巨大的破火山口，沉没在 300 余米深的海水中，形成了现在的桑托里尼岛。

日本九州南部的鬼界火山 (Kikai - Akahoya) 距今 7300 年前大爆发，火山爆炸指数为 7，在破火山口 700km 范围内堆积了 30cm 厚的空降火山灰，火山碎屑流运移达 100km，跨过海洋直达日本本土。这次火山大爆发造成严重的环境影响，大爆发引起大量的滑坡和洪水，大量的植物被摧毁，大爆发 900 年后区域生态都未能恢复到爆发前的状态。大爆发摧毁了日本新石器时代的绳文陶瓷文化。

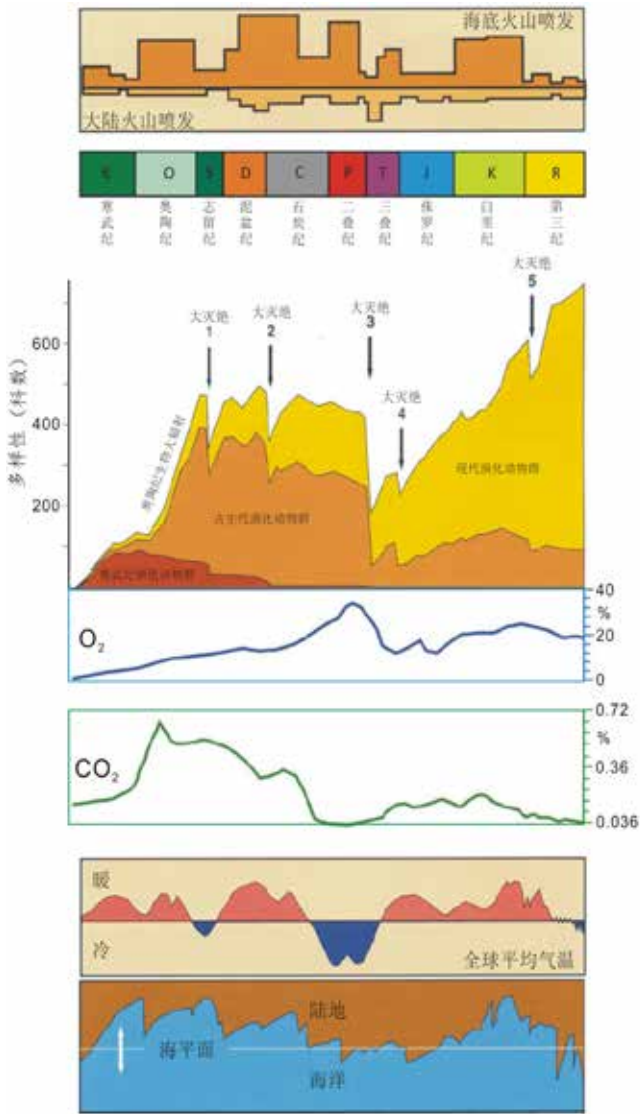


图3 塞普科斯基海洋无脊椎动物多样性、生物大灭绝、全球环境变化和大规模火山爆发关系图 (据Servais等, 2010; Bond等, 2017)

高达 10km，陨石坑直径达 170km 的陨石撞击事件尚不能引发明显的全球性生物灭绝事件。

地球化学最新研究表明，记录大灭绝的地层剖面中，汞元素的异常高富集已经成为源于地球大规模火山爆发导致的大灭绝的标志，铀的高富集通常指示源于地外行星撞击。奥陶纪末和二叠纪末记录大灭绝的沉积岩样品中汞元素的异常富集，这一特征与同时代的地幔柱火山喷发形成的大规模的熔岩流有关，为大规模火山喷发导致全球性生物大灭绝提供了新的证据。显生宙大规模火山喷发与五次大灭绝的对应关系，表明火山末日周期性重现及其对地球环境的长期影响在全球性生物大灭绝中起着主导作用。

(二) 近代火山爆发与环境影响

自 18 世纪以来, 火山喷发已造成 25 万人死亡, 1815 年印度尼西亚坦博拉火山 (Tambora) 大爆发时, 全球人口还低于 10 亿, 目前的世界人口已达 74 亿, 全球有 5 ~ 6 亿人口直接处于火山末日的笼罩下, 未来大规模火山喷发对人类的直接危害难以估量。

冰岛拉基火山 (Laki) 1783 年喷发, 喷出 8 百万吨氟化氢, 20% ~ 25% 的冰岛人死于火山喷发后的饥荒和氟中毒, 约 80% 的羊、50% 的牛、50% 的马死于牙和骨骼的氟中毒。喷发削弱了非洲和印度间的季风环流, 导致非洲地区降水减少, 引起 1784 年埃及饥荒, 六分之一的人口死亡。在英国, 由于火山灰大范围降落, 1783 年形成“砂夏 (Sand-Summer)”, 约有 25000 人死于由此引起的呼吸道疾病, 影响遍及欧洲、北美、墨西哥湾。火山喷发还导致数年的极端天气。

印度尼西亚坦博拉火山 1815 年喷发造成 92000 人死亡, 火山灰引发全球气候异常, 引发“硫酸盐气溶胶笼罩平流层”, 形成“火山冬天”, 使 1816 年成为“无夏天的一年”。北半球大部分地区农作物颗粒无收、全球性农业问题、牲畜大量死亡, 引起 19 世纪最严重的饥荒。火山灰导致美国北部地区连续干雾, 全球平均温度降低

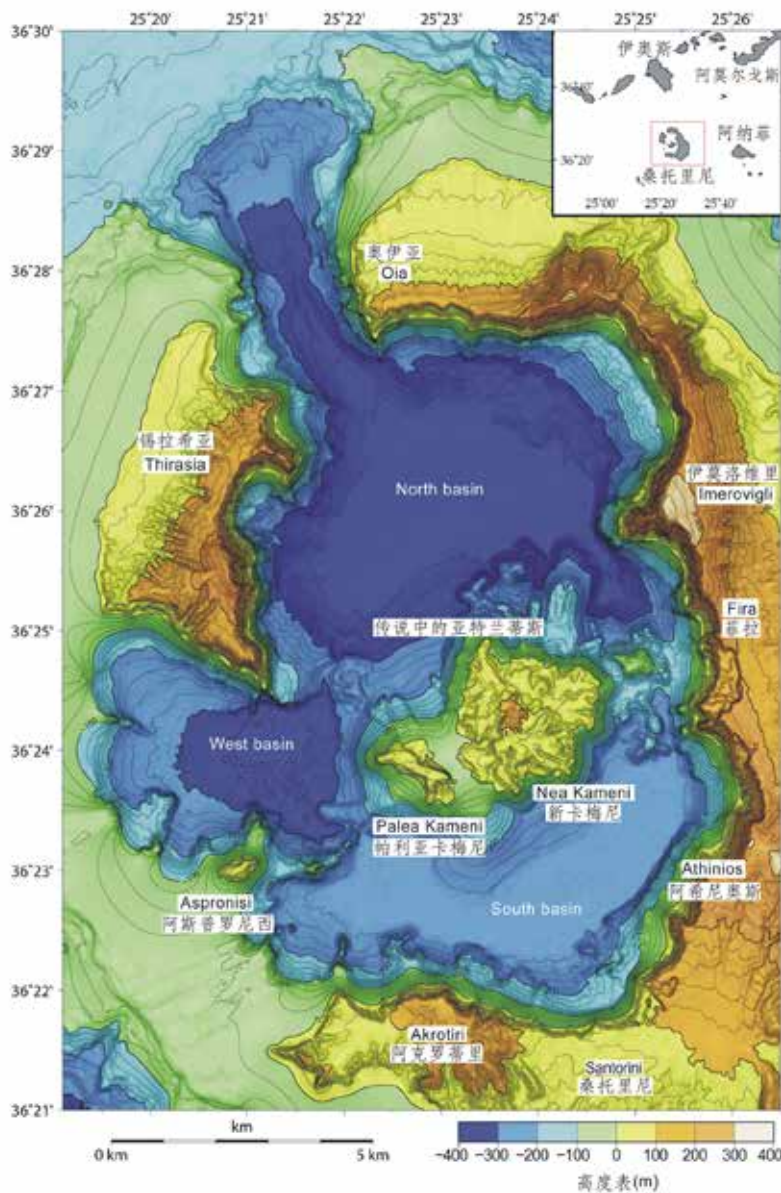


图4 桑托里尼岛锡拉火山 (据Nomikou等, 2014修改)



图5 锡拉火山米诺斯大爆发阿克罗蒂里考古发掘遗址 (Friedrich, 2013)

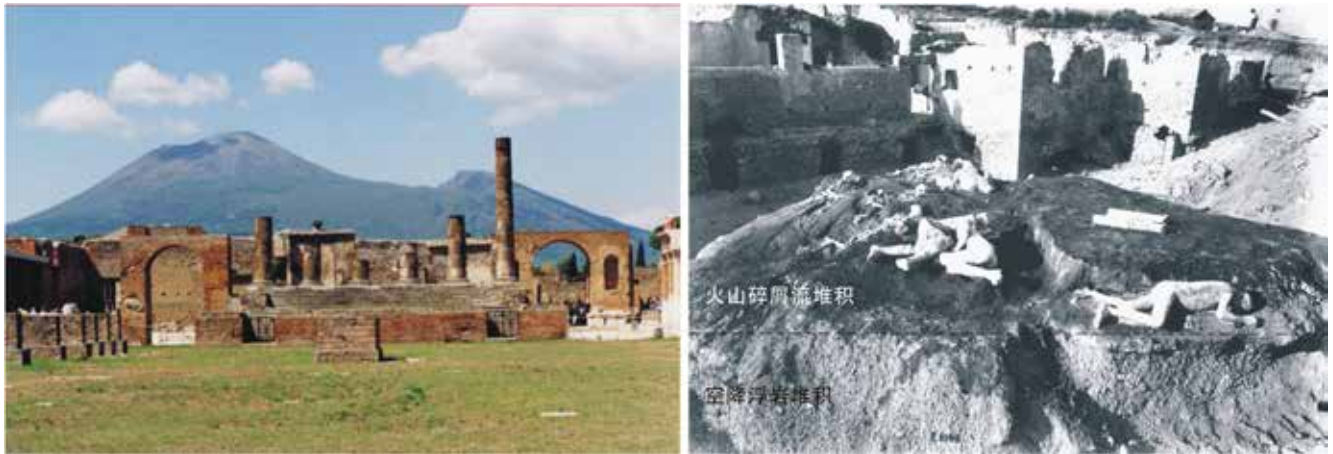


图6 维苏威火山、庞贝古城及其考古发掘现场图像（据Luongo等，2003修改）

0.4-0.5K, 引发美国东海岸六月霜冻和下雪, 并持续数月。欧洲部分地区遭遇寒冷的夏天和风暴多发的冬天。1816—1819年欧洲东南部和地中海东部遭遇严重的斑疹伤寒症困扰, 1816年孟加拉出现新霍乱病毒在全球扩散, 流行病加重。坦博拉火山的喷发造成中国、欧洲和北美地区的温度异常。

印度尼西亚喀拉喀托火山 (Krakatau) 1883年喷发造成36500人死亡, 火山灰云笼罩东南亚和澳大利亚西部地区, 释放的能量约合2亿吨TNT。火山灰喷射高度达80km。1883年8月27日的爆炸性喷发引发30m高的海啸。巽他海峡大部分区域和苏门答腊海滨地区受到火山碎屑流冲击, 火山碎屑流冲进海洋引发大规模海啸。

冰岛埃亚菲亚德拉火山 (Eyjafjallajokull) 2010年喷发, 虽然喷发规模远小于前面所列几次喷发, 但是产生的火山灰喷发柱高度约9km, 高纬度地区火山灰被喷发到平流层, 造成欧洲自二战以来的最严重的航空运输危机。为了避免空中灾难, 欧洲大部分机场关闭持续一周之久, 经济损失达20~50亿美元。

从全球火山的分布来看, 人口聚集区发生大规模的火山喷发将严重影响交通运输, 进而干扰商业活动、食品供应、医疗等。长期影响气候变化, 进而

导致农业、地下水和土壤污染、流行病的传播, 造成无法评估的社会灾难和人口伤亡。在全球和区域性尺度上, 大规模火山喷发对环境的影响巨大, 可产生短期或长期急剧的气候变化, 引起食物供应危机, 影响生物圈物种的生存。

最近爱丁堡大学的研究团队在南极西部裂谷近千米厚的冰盖之下发现了138座火山, 这些火山集中沿南极西部裂谷系统的走向分布, 绵延达3000km, 这将超越东非大裂谷成为世界大陆上最大的火山-裂谷系统。此外, 越来越多的证据表明, 伴随着南极冰盖的快速崩塌和融化, 南极冰盖下地幔柱和“热点”的存在可能变为事实(图7)。在大家激烈争论碳排放、全球变暖引起南极冰川融化时, 可曾想南极冰盖已在火山和炽热岩浆之上, 未来南极冰盖下如果发生大规模火山爆发, 其后果将是难以想象的!

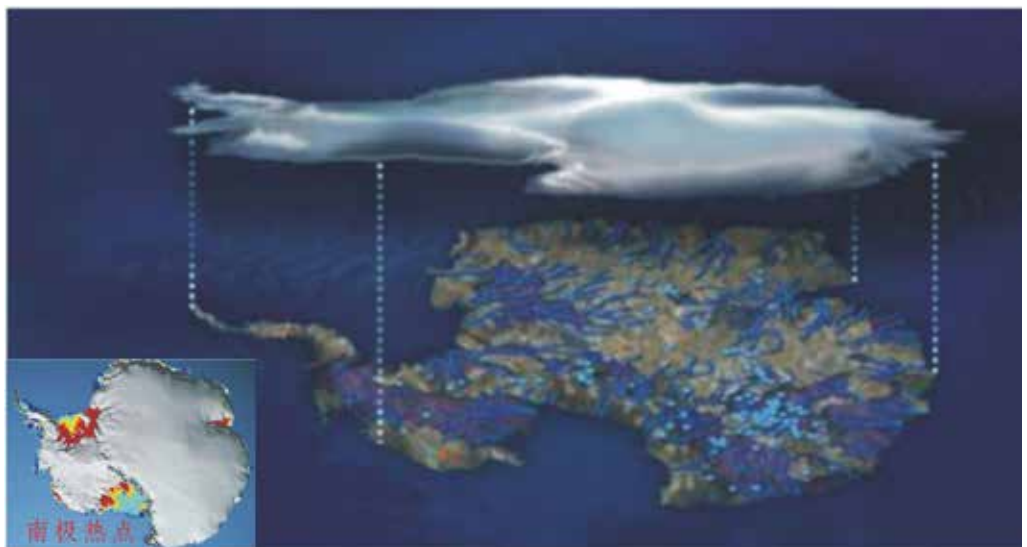


图7 南极冰下热点和河流分布示意图（引自NSF/Zina Deretsky）

（三）把握火山脉搏

就火山喷发的规模和时间尺度而言，全新世的几次大规模火山喷发主要以千年和数百年计，时间尺度较小；而对于大灭绝而言，其时间尺度可达数百万年。根据数据对比，可以看出全新世的火山喷发尚处于大规模或超级火山喷发的间歇期。因为超级火山喷发周期长、危害大，可称之为低频-高危型火山爆发，一般火山喷发周期短，危害相对小，可称之为高频-低危型火山喷发。总体上，全新世以来，没有爆炸指数达到8或以上的毁灭性火山喷发，低频-高危型火山喷发较少，以高频-低危型火山喷发为主。因此，对人类文明的可持续发展来说，把握火山脉搏，进行低频-高危型超级火山的研究和预测有重要意义。

超级火山喷发与未来地球

（一）发现超级火山

超级火山 (super volcano) 和超级喷发 (super eruptions) 因 2000 年英国 BBC 推出的关于火山喷发的纪录片而流行起来。该纪录片起到了很好的科普作用，增强了普通大众对火山喷发的了解和兴趣。实际上，火山学家对地球上超大规模火山喷发的关注要早得多。van Bemmelen (1949) 首次描述了地球上存在超大规模的火山喷发的证据，其识别出自火山喷发形成的环绕印度尼西亚苏门答腊岛多巴湖的巨厚火山灰堆积。首先应用“super eruption”描述超大规模的火山喷发的是 Rampino 和 Self (1992)。但一直没有给予这类喷发明确的定义。直到 Sparks (2005) 认为喷射岩浆量超过 10^{15}kg ，等价于体积上超过 450km^3 的大规模的火山喷发为超级喷发。尽管有些古火山的熔岩流喷溢（泛流式玄武岩，而不是爆炸性喷发）具有类似的岩浆体积规模和深远影响，但是“super eruption”一词一般仅应用于持续时间相对短的爆炸性喷发事件。这类量级的爆炸性喷发在火山爆炸指数 8 或以上，产生的碎屑物在体积上达到 1000km^3 或以上，超级火山通常形成巨大的破火

山口 (图 8)。

地球物理探测表明美国黄石火山 (Yellow stone) 和印度尼西亚多巴火山均具有跨壳幔的多级岩浆系统，在浅部地壳拥有巨大的岩浆房，储集大量岩浆，可直接形成超级喷发。由于岩浆系统的差异 (图 9)，超级火山的喷发机制主要是岩浆浮力导致在岩浆房顶部形成超压，引起超级喷发。一般的火山喷发主要多是幔源岩浆的补给引起岩浆房超压促使爆发。大火成岩省 (LIPs) 喷发主要是大规模幔源基性岩浆的溢流喷发。

（二）超级火山危机

研究表明，在过去的 3600 万年，地球上已经识别出 42 次爆炸指数为 8 的火山喷发，代表性的除了多巴火山喷发 (约在 74000 年前)，还有新西兰陶波火山喷发 (Taupo) (约在 24000 年前)、黄石火山喷发 (约在 640000 年前) 等。

苏门答腊岛的多巴火山约在 74000 年前的大喷发，爆炸指数为 8，火山喷发释放大气中约 800km^3 的火山灰和硫酸盐气溶胶，覆盖东南亚大部分地区，厚度达 10cm，致使大部分植物毁灭。随后数年，中纬度地区降温达 $5 \sim 15\text{K}$ 。研究认为若多巴级别的火山喷发在同一地区再次出现，除了导致东南亚地区数以千万的人死亡外，火山喷发对农作物的破坏，会引发世界上最密集地区 20 亿人口饥荒。这将是史

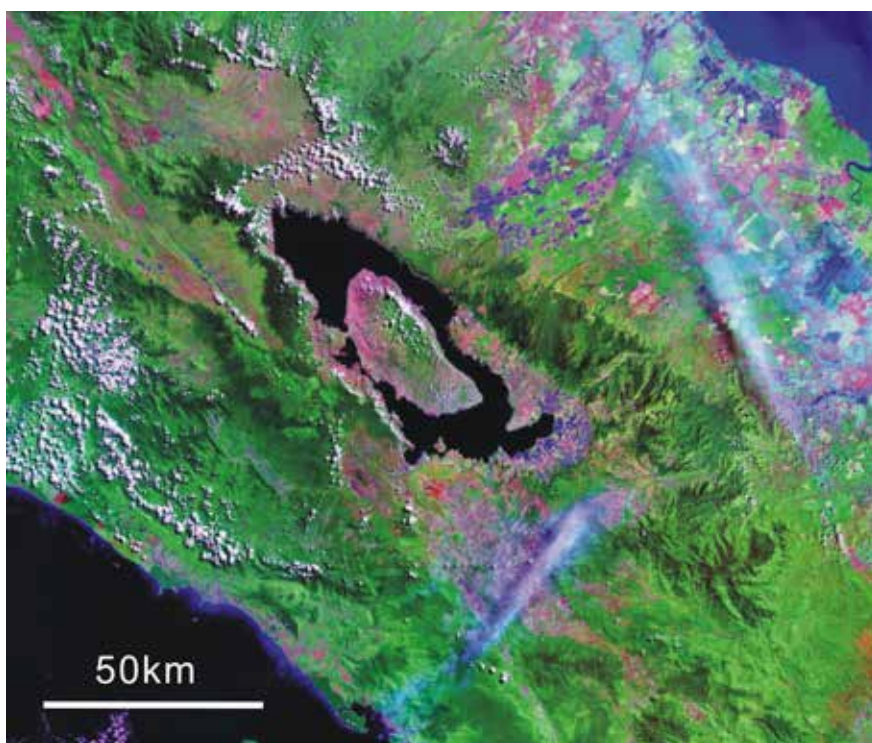


图8 多巴 (Toba) 火山口湖 (引自NASA)

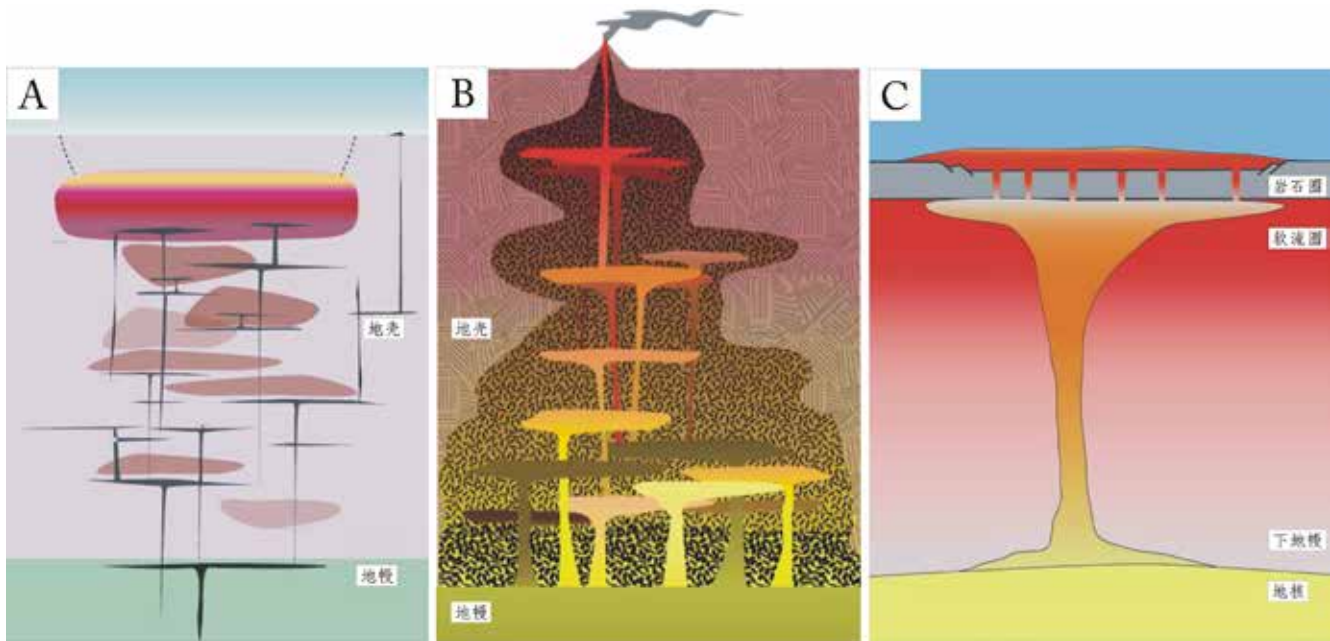


图9 岩浆系统示意图（据Miller等，2008；Cashman等，2017修改）

A. 超级火山岩浆系统；B. 一般火山岩浆系统；C. 地幔柱岩浆系统

无前例的毁灭性的大灾难。整个东南亚地区的航空和地面交通也将面临瘫痪。

我国长白山天池火山 946 年大喷发，火山灰和火山碎屑物的喷发体积达 120km^3 ，喷发的火山碎屑物和火山碎屑流在长白山区方圆数千平方千米的范围内散落堆积，使火山周围大面积原始森林和生物被火山碎屑流、火山泥石流掩埋摧毁，进入平流层的火山灰则一直飘落至朝鲜半岛、日本海以及日本北部等地。喷发形成的硫酸盐气溶胶，导致地表温度大幅下降，造成大规模酸雨和火山灰云，引发北半球长达 7 年之久的“火山冬季”。

担心世界末日的到来吗？也许我们更应该警惕火山末日的到来。危险可能不在我们可望不可及的天空，它就在我们脚下，因为我们尚不知道它在何地形成？何时来到？

（三）演化着的地球——末日与新生

火山末日对生命和人类文明是致命的。然而，火山在毁灭，也开启新生。7.5 亿年前，地球从“雪球”事件走来，火山喷发使海洋再次富集 Ca、Mg、Si、P 元素，使藻类繁盛，开启生命之源。从地史更长的时间尺度上，火山大爆发是生物系统演化的催化剂，大灭绝犹如确保演化持续的发动机。在生物爆发 - 平衡 - 毁灭 - 新生的选择性演进中推动生命系统向更高阶段发展。人类文明的发展也不是连续的，一个文明的消失，往往伴随着一个更高文明的新生。没有尼安

德特文明的消失，可能也没有欧洲现代智人的出现。火山活动、全球气候变化、生物演变都体现出系统演化的特点，而且每一个系统都不是孤立的，通过复杂的耦合 - 反馈机制，推动地球系统向更高阶段发展。这是稳定平衡系统的扰动，还是混沌系统的涨落？人类会遇到无限的问题，找到的只是部分的证据，更多的密码还掌握在大自然的手里。

结束语

伴随着超大陆的裂解和集结，板块构造不断形成新的格局，有的火山长埋地下，有的火山已剥蚀殆尽，有的火山正在消亡，有的火山成为新构造的宠儿。在数以百万年计的时间尺度上进行着新老的更替。生命的毁灭与新生也仍然在这里上演，活火山周期性的活动挑战着人类文明和生物多样性的空间，蛰伏的超级火山困扰着科学家的神经，左右着人类本身的存亡，推动着地球系统的演化。

本文由北京市教委科研项目 (KM201710028013) 和国家自然科学基金项目 (41372343、41002121、40872062) 共同资助