



梁毅强，中国地震局监测预报司副调研员，中国地震局地质研究所构造地质学专业博士研究生，研究方向为火山灾害评估与应急技术，中级职称，2006年获武汉大学固体地球物理学硕士学位。先后参与国家自然科学基金项目、教育部重点实验室资金项目及中央级公益性科研院所基本科研业务专项等多项。发表学术论文5篇。

# 火山与航空安全

梁毅强 许建东 于红梅

火山喷发产生的灾害包括火山碎屑流、火山熔岩流、火山碎屑空降、火山泥石流，以及火山喷发引起的滑坡、地震、海啸等。其中，火山碎屑空降是最普遍、最频繁的一种火山灾害，是火山灾害中占主导地位的危害类型，特别是火山灰对航空的影响最大。

## 火山碎屑空降灾害

当火山发生爆炸式喷发时，岩浆或岩石被炸成碎片，大块的火山碎屑（一般大于64mm）以弹道式从火口抛射出，会产生强大的冲击力。相对小的火山碎屑（2~64mm）被喷向空中产生一个喷发柱，在风和重力影响下降落到地面，会对建筑物、交通、水资源、电力供应、通信设备、农业等造成严重破坏，既是火山灰厚度只有几毫米，也可能造成潜在的重大社会影响（图1）。

最小的火山碎屑即火山灰（<2mm）很容易在喷发柱内部向上对流，达到平流层，在很长一段时间内顺风前进，这些火山灰可能会影响数百甚至数千平方千米的社区和农田。例如，1815年印度尼西亚的坦博拉（Tambora）火山爆发的火山灰沉积，导致几个岛屿上的大米和玉米严重歉收，使得大约80000人陷于饥荒。火山灰还会导致飞机发动机引擎损坏，成为航空的主要危害。2010年4月14日冰岛艾雅法拉（Eyjafjallajökull）火山突然喷发，虽然喷发的规模不大，但由于气流和天气原因，飘散的火山灰致使欧洲空中交通瘫痪了数日。此外，人类和动物一旦吸入细火山灰，就会对他们的健康造成影响；这些细小的火山灰颗粒甚至可能会引起气候的变化。例如，1991年6月15日菲律宾皮纳图博（Pinatubo）火山喷发，导致两年内全球平均温度下降1℃。



图1 2014年2月14日，火山灰在克鲁德山火山以西约150公里（93英里）处覆盖了一架飞机和Solo机场

## 火山灰对航空飞行的影响

火山在强烈爆炸性喷发的情况下，火山灰的高度可高达数十千米，最小颗粒的火山灰（粒径为1~15微米）可以形成火山灰云，在大气中可停留持续数天。当火山灰云上升到对流层或平流层，将会随风漂移，甚至漂移很远的距离。图2是2010年4月14日冰岛艾雅法拉火山喷发的火山灰扩散分布图，显示了每6小时的变化情况。从图中可以看出，火山灰扩散范围越来越大，高度也在不断上升。

1989年12月5日就发生了1例航空安全事件，一架由阿姆斯特丹飞往东京的荷兰皇家航空B747-400客机，在阿拉斯加空域进入里道特火山（Mount Redoubt）爆发后的火山灰云，4台发动机全部熄火，飞行高度从8534米急速下降到4267米，所幸在下降过程中发动机成功重新启动，最后安全降落在安克雷奇国际机场，无人伤亡。尽管目前还没有因火山灰造成的伤亡事故报告，潜在的危险不容小觑。

据统计，自20世纪80年代以来，全世界约发生了100起与火山活动相关的事件。火山灰可能损坏飞机发动机，导

致速度指示表等各种仪器失灵而产生错误警示，引起发电机和电子元件变形，遮挡飞机挡风玻璃，腐蚀飞机机体，有毒气体影响飞行员健康，严重危及航空安全（图3）。另外，火山灰会污染航空器通风和增压系统，磨损转动部件，腐蚀航空器外部组件和设备，影响机场跑道制动效果，严重影响航空器的可靠性，也大大增加航空运维费用。

发动机受损的主要原因是飞机在通过火山灰污染的空域时，发动机会吸入细小的火山灰，火山灰的主要成分是硅酸盐，其熔点约1100℃，而发动机正常运行的温度为1400℃，所以吸入的火山灰会被融化成气体，而后又在喷嘴导向叶片、涡轮叶片上冷却成火山灰颗粒，并附着在叶片上，导致发动机空中停车（图4）。

## 国际火山灰咨询机制

鉴于火山灰危害的严重性，为了使航空器避开火山灰云的影响，国际民航组织（ICAO）与世界气象组织（WMO）合作，于1993年启动了国际航线火山灰监测（IAVW）项目。此后，国际民航组织和世界气象组织规定，个别地区的气象

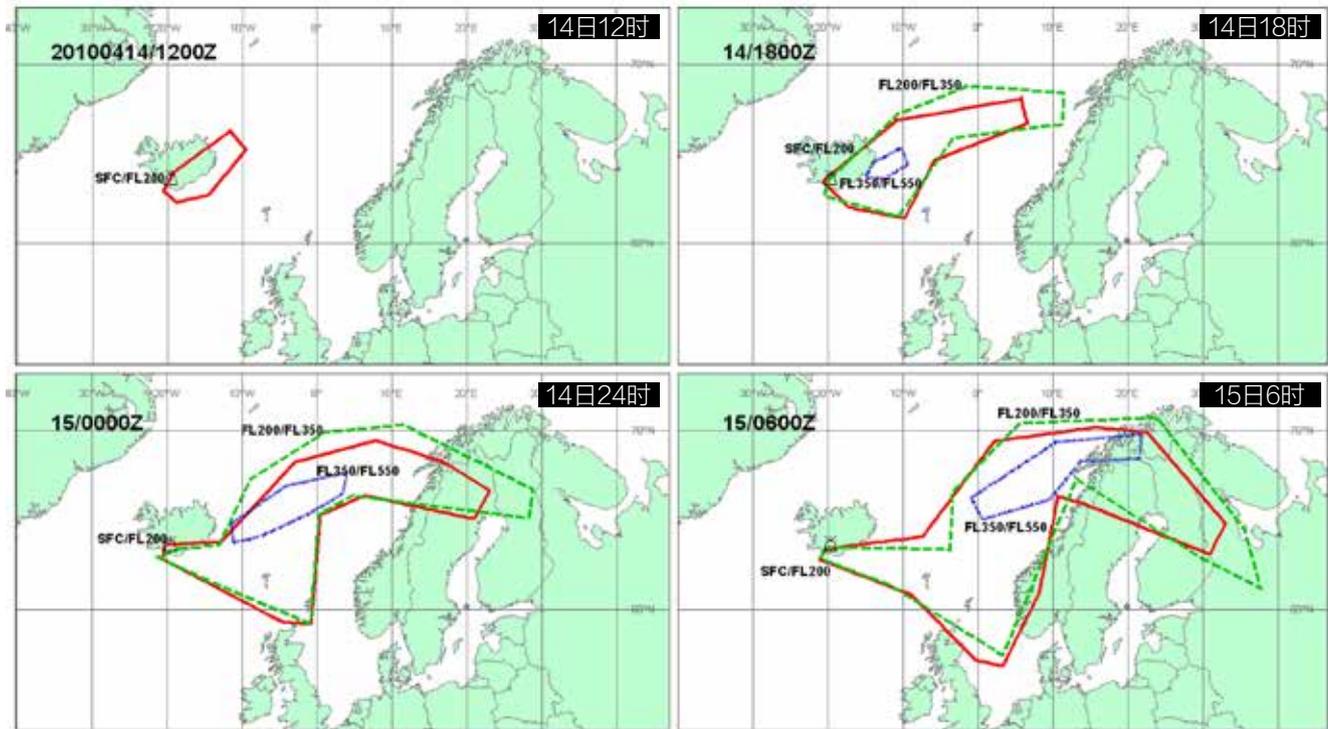


图2 冰岛艾雅法拉火山喷发火山灰扩散分布图（引自英国气象局）

〔注：红色区域为20000英尺高度的火山灰扩散范围，绿色区域为20000英尺-35000英尺的范围，蓝色区域为35000英尺-55000英尺的范围，FL（FlightLevel）为飞行高度，单位是100英尺（1英尺=0.3048米），FL200为飞行高度为20000英尺，约为6096米〕

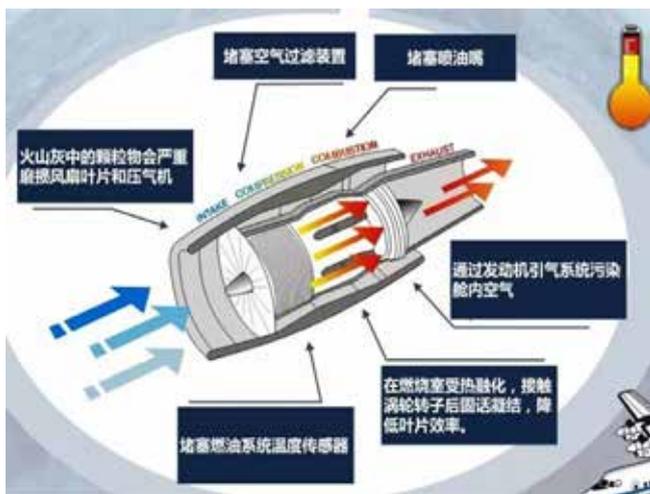


图3 火山灰影响航空安全示意图



图4 火山灰严重损坏飞机发动机

监视台应像在恶劣气象条件下发布重要气象情报（SIGMET）一样，发布有关火山灰云的报告，并且为此成立了火山灰咨询中心（VAAC）。火山灰咨询中心是专门负责协调和发布有关可能危及航空安全的大气火山灰云信息的专家组织，其任务是在指定的空域内监测火山灰云的位置和运动信息。目前世界各地共有9个火山灰咨询中心，它们分别设在日本东京、美国华盛顿、美国安克雷奇、澳大利亚达尔文、新西兰惠灵顿、

加拿大蒙特利尔、英国伦敦、法国图卢兹和阿根廷布宜诺斯艾利斯，每个中心有明确的责任区域（图5）。

VAAC 服务项目包括收集火山喷发情报、火山活动情报和观测到的火山灰云情报，以及火山灰运移和扩散（VATD）的计算机模拟结果，为有关气象监测台发布火山灰云报告提供情报和数据分析。各个VAAC 作为其所在国家的天气预报组织的一部分运行，例如华盛顿火山灰咨询中心隶属美国国

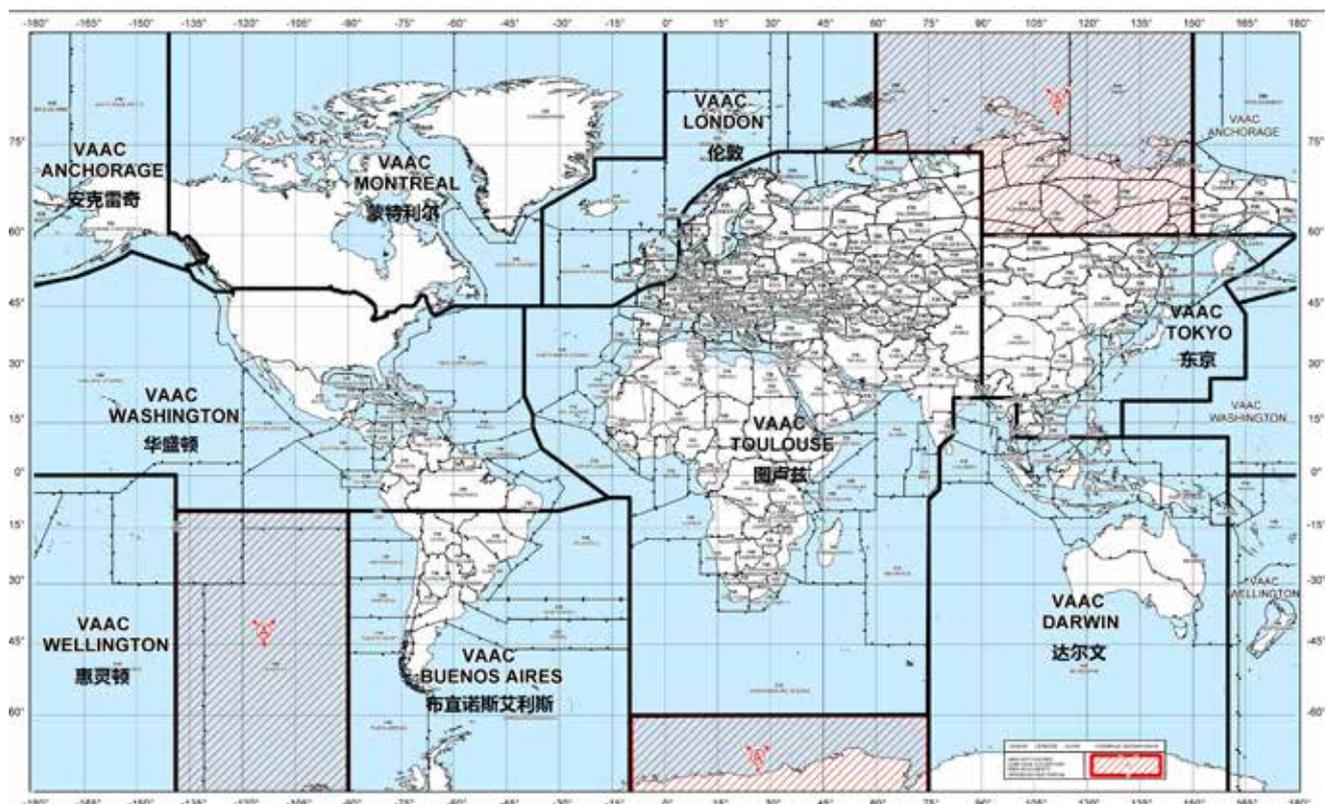


图5 覆盖全球的九个VAAC（图中阴影区域为VAAC未覆盖的区域，引自维基百科）

家海洋和大气管理局（NOAA），伦敦火山灰咨询中心隶属英国气象局。这些中心在日常运行中要与相邻的VAAC、区域内和附近的飞行控制中心以及气象台进行沟通协调。

除俄罗斯北部、北极地区，南太平洋和南极的一部分区域未覆盖（详见图6的阴影区域），VAAC的责任范围覆盖了世界大部分地区。VAAC涵盖的区域由坐标或航班信息区域（FIR）设定，这些区域是国际公认的国际民航组织IAVW计划的一部分，每个负责的区域都在IAVW手册中列出。

当检测到火山灰云时，VAAC将收集所有可用信息，预测不同飞行高度的灰云路径，按照IAVW程序手册中的规定向航空和气象办公室发出警报。警报以火山灰咨询报告的形式发布，包括火山的名称、火山所在的国家、位置和火山口高度，信息来源（如来自卫星或飞行员观察），火山喷发的详细信息（包括世界标准时间UTC和火山爆发的日期），火山灰的详细信息（包括飞行高度和大小），火山灰云当前运动的详细信息，和此后6小时、12小时和18小时火山灰运动的预测信息，并在相应时间节点提供新的咨询报告。目前VAAC和欧洲气象卫星应用组织（EUMETSAT）针对全球

主要火山喷发事件提供基于卫星影像的全球火山灰云分布图，为客观评价大气中火山灰云的迁移变化提供了参考依据。

## 火山风险警报分级

世界各地的火山风险警报级别各不相同。除航空颜色代码外，目前还没有标准化的国际火山风险警报级别系统。这是因为各个火山的特点和监测能力差异很大，而且不同国家的语言和颜色或警戒级别的象征也不同。世界火山观测组织（WOVO）建议：对自然灾害感兴趣的组织不要采信非火山观测站的业余团体的信息来发布火山风险警报或火山爆发“预报”，因为发布风险警报级别可能会产生重大的公共安全事件和经济影响，最好由最熟悉其火山活动的区域火山观测站的工作人员进行评估。对于希望获得当前火山活动报道准实时概况的人，WOVO推荐参考史密森学会（GVP）和美国地质调查局编制的每周火山活动报告。GVP还提供长期火山活动月度摘要和世界火山及其爆发历史目录。

为帮助飞机避开火山灰，国际航空火山观察组织开发了一套通用的航空火山警戒级别系统，这是由联合国专家机构

国际民用航空组织协调的全球预警系统。该系统采用四种颜色代码（表1）。这个通用的系统特别适合于航空部门，因为飞行员、调度员和空中交通管制员在全球范围内规划或执行航班时，需要迅速确定多个国家的众多火山的状况，并确定是否需要继续关注、重新安排路线或增加额外的燃油。这些颜色代码反映了火山或火山附近的情况，但不适用于火山灰在顺风方向造成的危害，因为所有可识别的火山灰云都是极度危险的，都应该避开飞行。而且必须指出，航空彩色代码不能代表地面上的危险，因为这可能是完全不同的。

表1 国际民用航空组织推荐的航空颜色代码（引自WOVO）

绿色	火山处于正常的非爆发状态 或者，在从更高级别下调之后火山活动已经停止，并且火山恢复到其正常的非爆发状态
黄色	火山正在经历高于已知背景水平的动荡 或者，在从更高级别下调之后火山活动显著减少，但需要继续密切监测可能重新增加的活动。
橙色	火山表现出更高的动荡，火山喷发的可能性增加 或者，火山爆发正在进行中，没有或有轻微的灰烬排放。 [如果可能的话，给出火山灰柱高度]
红色	预计火山即将爆发，可能会有大量灰烬排放到大气中 或者，火山正在爆发，大量的灰烬排放到大气中 [如果可能的话，给出火山灰柱高度]

国际民航组织还在考虑使用新的结构化信息，以清晰、简洁和易于使用的格式，将危险信息从火山观测站传递给空中交通管制员、调度员、飞行员和航空气象学家。目前，已经开发出了一种消息格式模板，称为火山观测站航空通告（VONA），其结构化格式旨在帮助那些办事处的非火山学家也能更容易理解和使用火山信息。当某火山的航空色码发生变化（上升或下降）时，或者当火山喷发事件或其他火山活动发生重大变化时，火山观测站可以发出航空通告。火山观测站将VONA发送（传真或电子邮件）到相关的区域控制中心、气象观察办公室和火山灰咨询中心。

### 火山灰灾害减灾策略

如何有效地预防和减轻火山灰对人类和生存环境的危害是政府官员和火山学家们面临的一项重要课题。从减灾策略的角度，大致可以分为科学技术类和社会工程类。

科学技术类专注于强化对火山灰空降模型的研究。与其他火山灾害相比，火山灰空降的影响因素更为复杂化和多元化，其灾害程度受喷发源距离、火山灰扩散方向、火山灰沉积厚度、火山灰物理和化学性质、气候环境特征等影响。从

目前的研究进展来看，火山灰空降模型可以分为两个主要类型：颗粒跟踪模型和平流扩散模型。颗粒跟踪模型为欧拉和拉格朗日模型，如CANERM模型、MEDIA模型、PUFF模型和VAFTD模型等，这些模型在一定的时间和空间内，能预测火山灰云的位置，主要应用到航空安全上。平流扩散模型为欧拉模型，例如ASHFALL模型、Conner 2001模型、HAZMAP模型、TEPHRA和TEPHRA2模型等，它能描述颗粒扩散、传播和沉积方程的解，能够预测火山喷发后火山灰在地面上任意一点上的沉积量。这些模型主要用于火山所在地安全性的预测。在此基础上，可以及时对火山灰的扩散趋势及相关地区的安全性做出动态评估，及时为政府和公众提供有效的产品和信息，例如给出警报和减灾措施建议。

社会工程类聚焦于人类的社会行为。火山喷发前，政府机构可以组织火山附近的居民有条不紊地撤离，发出旅游警告，提醒旅游者避免前往火山所在地区，并做好喷发期间的各项应急准备；火山喷发期间，火山观测和专业咨询机构产出的产品和信息（如火山灰扩散预测图、火山观测站航空通告等）可以让火山灰扩散涉及地区的居民提前做好应对准备，减少财产损失，保护人身安全，相关航空公司可以据此修改或者停运火山灰扩散区域涉及的航路。在火山平静期间，火山附近的居民、地方官员和旅游者可以开展有关火山和火山灾害方面的科普教育，广泛宣传防灾自救知识，尽可能地掌握一些简易的自救方法并购置有效的自救工具。只有两类策略综合运用，才能最大限度地降低火山灾害损失。

### 结束语

火山灰对自然环境和人类社会各种活动影响巨大。目前，人类已就火山灰对气候、农业、交通、建筑物、水资源、电力供应、通信设备等方面的影响开展了较为广泛而深入的研究，形成了一系列的应对防范和开发利用的措施。但是人类面对自然界的力量仍然显得微不足道，总体上仍处于被动防范和防御的地位。今后要想实现人类和火山的和谐相处，仍然需要付出艰苦的努力，比如不断探索研究火山的成因，加强监测预警技术，强化各种应对措施和应急准备等。随着现代科学技术的快速发展，相信这一天将会很快到来。☑

本文受中央级公益性科研院所基本科研业务专项（IGCEA1603）资助。