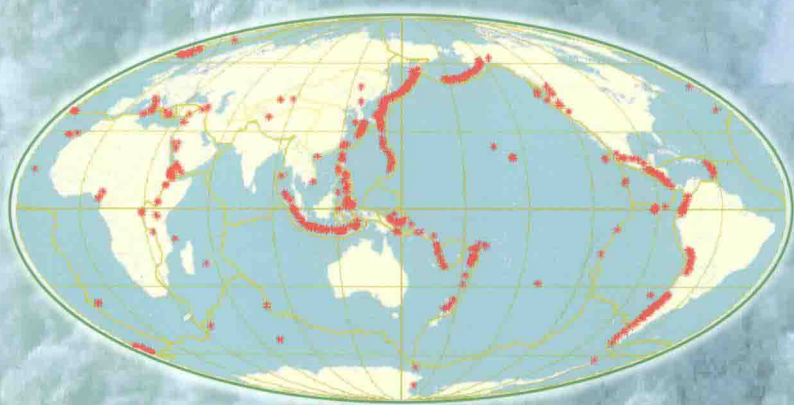


火山预测与预警

Prediction and Early-Warning of Volcano

洪汉净 编著



地震出版社

火山预测与预警

洪汉净 编著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

火山预测与预警 / 洪汉净编著. —北京: 地震出版社, 2013.11

ISBN 978-7-5028-4139-3

I. ①火… II. ①洪… III. ①火山—监测②火山喷发—预警系统 IV. ①P317

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第239893号

地震版 XM2098

火山预测与预警

洪汉净 编著

责任编辑: 董 青

责任校对: 庞亚萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大天成印务有限公司

版(印)次: 2013年11月第一版 2013年11月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 433千字

印张: 19.75

印数: 0001~1000

书号: 978-7-5028-4139-3 / P(4820)

定价: 90.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

自然灾害对人类社会所造成的危害往往是触目惊心的。突发性的地质灾害，如地震、火山、泥石流、海啸、台风、洪水等带来的灾难更是措手不及和致命的。火山喷发不仅造成火山附近居民的生命财产的损失，而且还影响航空业和气候。人们对 2010 年 4 月冰岛火山喷发还记忆犹新，一次中等规模（4 级）的喷发就造成了欧洲航空业的停滞与全球生活秩序的混乱。1815 年坦博拉火山喷发后，次年春夏全球变冷，1816 年因而被称为没有夏天的一年。

为了减轻火山灾害造成的损失，我们需要在火山监测和研究的基础上对未来火山喷发的危险进行预测。火山预测是火山学研究最基本的目标（Sparks,2003），它是在喷发前利用多学科的手段进行喷发时间、地点、规模、形式和过程的预测。火山预测的目的是火山减灾，还需要将预测的科学研究成果转化为可以实施的预警行动。火山灾害预警是通过火山监测，察觉火山扰动，判断喷发及其灾害的危险等级，并在政府组织下采取疏散等应急减灾对策，以应对将要发生的喷发，减少各种灾害造成的损失。

火山预测和预警的最基本的条件是认识火山。人们对火山的认识也是由表及里、由浅入深的。通常先认识火山喷发的岩石，研究其化学成分及来源，进而研究火山内部结构及其活动规律，为此建立了火山观测站。1841 年在意大利维苏威火山建立观测站，1912 年美国夏威夷火观测站开始观测，1928 年日本阿苏火山观测站建立。1988 年我国建立五大连池火山观测站。这些观测站观察火山的变化（包括蒸汽喷发、植物死亡等），记录火山地震活动，测量火山的形态，地温、重力的变化，研究活动火山的喷发过程。现代火山学就是在火山观测的基础上，在 20 世纪逐步发展起来的一门新的

科学，成为地球科学的一个重要分支（Williams & Mcbirney, 1979；Tilling, 1997）。

为了区别火山喷发的危险程度，人们把火山分为活火山、休眠火山和死火山。活火山通常定义为“历史上有过喷发、现在又有活动的火山”，指的是目前正在喷发岩浆，或者正在发生与岩浆活动有关的火山地震、形变、气体活动的火山。广义的活动火山还包括有潜在喷发危险的火山，有人称其为“具有活动能力的火山”。

然而判定火山是活火山还是死火山，确实是件不易的事情。一座火山的活动往往是一个短暂的喷发之后连接着一个漫长的休眠期，休眠期可以从几年到几十万年甚至更长。处在休眠期中的火山往往是会重新喷发的，关键是判断休眠期结束的时间。

就目前的科学水平看，人们还不能准确无误地预测火山喷发，特别是那些长期休眠火山的再苏醒。原来认定的某些死火山，可能突然地爆发了，造成了巨大的灾害。如意大利的维苏威火山，在公元前8世纪发生过一次大的喷发，后来被认定为死火山，谁也没有料到它于公元79年8月24日又突然爆发，损失惨重，喷出的火山灰埋没了整个庞贝城，火山泥石流冲毁了库拉纽姆城。印度尼西亚坦博拉火山在1815年爆发前曾未喷发过，人们也认为它是死火山，可是这座所谓死火山于1815年4月5日突然爆发了，夺走了近10万人的生命。同样被认为“死了”的巴布亚新几内亚的拉明顿火山于1951年突然爆发，火山碎屑流使2900人丧生。这样的事例屡见不鲜，对人类的损失是极为惨重的，应以此为训。

火山灾难属于小概率事件，大多数人往往没有直接的经验。当人们身处危机之中时，当然会产生强烈的减灾的情绪，但是随着危机的结束，人们的注意力迅速减退转移。灾难过后人们往往心理麻痹，认为灾难不会降临到自己身上。其原因在于人的头脑不是很愿意接受小概率灾难发生的可能性，往往认为小概率可以忽略，进而断定不会发生灾难。这就不难理解人们不断地在高风险的地区大兴土木，活火山周围人口密集，而且不做减灾防灾的准备。

大多数时候，人们的直觉和分析思考能力都很正常，但是，当潜在的损失十分巨大或可能性很小时，人们的分析思考能力往往不起作用。要克服保持理性所面临的障碍，就需要仔细研究几十年来面临风险时的人类行为，汲

取火山灾难的教训和减灾的经验，将之转化为可行的决策，这是对灾难风险作出有效反应的基础。

火山和地震都是现今地球动力学的表象，地震主要反映构造机械能的集中与释放，而火山主要反映岩浆热能的集中与释放。大家知道，机械能和热能是可以互相转化的，火山与构造活动的相互作用已经被广泛讨论（如 Vogfjord et al., 2005 ; Hautmann et al., 2008），火山与地震之间的关系也被广泛注意（Cigolini et al., 2007）。地震、火山预测的一个前提是它们的时空强分布及其构造背景，地震活动已经有了详细的目录，今天我们已经可以得到地震的时空强分布，而对火山，用得最普遍的是世界火山数据库的全新世火山目录（Siebert & Simkin, 2002），然而它主要提供空间地理坐标、火山类型等，时间上只是分为全新世、人类学、同位素年代、历史记录等几类。我们需要通过不断地努力得到火山喷发的时空强分布规律，这样才能掌握现今岩浆活动的演化图像。对火山活动演化的理解也有利于地震预测。

Bianco & Crampin (2005) 比较了地震预报和火山预报，认为地震与火山的基本的破裂机制是类似的，地震活动中的破裂促使断层两侧块体的错动，而火山活动中，破裂使高压的岩浆有溢出的通道，证明了火山和地震前的应力和破裂是类似的。安艺敬一（2009）认为火山和地震不仅在预测策略上，而且在物理模型上都可以很相似。假设火山喷发量（地震的应力降）和岩浆补给速率（两次地震间应力积累的速率）都是常量，模拟火山模型（Aki & Ferrazzini, 2001）和模拟地震循环（Shimazaki & Nakata, 1980）有相似性。

活动火山监测、喷发预测与研究是地球科学监测研究中不可或缺的一个重要方面。火山喷发与火山岩带来深部地球的丰富信息，除了超深钻外，火山监测研究是我们直接接触、认知深部地球的有效途径。如果说地震观测是研究地球内部动力学的主要手段，那么火山观测是研究地热与地球化学的主要手段。

火山、地震与气象都是全球性的现象。我们不可能不考虑全球尺度的大气环流而孤立地预报一个城市的天气。在一个复杂动力系统中，初始条件下微小的变化能带动整个系统的长期的巨大的连锁反应。火山、地震也一样，为了减轻火山与地震灾害，我们需要研究板块运动及其动力。板块运动通常被认为是自我驱动的，由于板块之间和内部的耗散而远离平衡的系统，地幔只是提供能量和物质。无论板块运动或地幔对流都是全球性的。离开了全球

板块运动的动力约束,孤立地研究一条断裂带或相关的地块活动及其地震的表现是很困难的。

根据统计上的合理性和地质年代的约定,国际上通常使用全新世或10000年作为活火山的标准(Szakács, 1994)。全球火山数据库也采用了这个定义(Simkin & Siebert, 1994),全球有1500多座活动火山,其中有历史记录的有560多座。本书讨论的主要是历史记录的活动火山。

全球有历史记录的火山灾害死亡人数近30万人,其中亚洲地区近22万人,占72.5%,除了地质上的原因外,亚洲地区的社会的易损性是重要的因素。亚洲人口密度大,使得灾害的损失也大;亚洲国家多数属不发达国家,缺乏对减灾的财政支持;社会对减灾的认识不足,对火山喷发及其灾害的监测与研究不重视;另外,公众也缺乏对火山灾害的知晓性。为了减灾,需要认识减灾的重要性,提高社会在灾害面前的韧性。

我国也存在火山活动的威胁(刘若新等, 1998; 刘嘉麒, 1999; 洪汉净等, 2007),近年来已经出版一些介绍火山预测的书籍(李玉锁等, 1998; 陈颢、史培军, 2007)。中国地震局通过“十五”计划建立了长白山、腾冲等6个火山观测台。然而我国大部分没有经历过火山灾害,缺乏火山喷发的实例与预测经验。本书通过介绍世界活动火山以及一些喷发过程与预警的实例,介绍国外火山预测和预警工作的基本方法及其经验教训。本书是在长期积累资料与本人讲义^①的基础上撰写而成的,旨在为我国的火山监测提供资料与参考,对广大地学工作者了解火山灾害及其预测也是有用的。

第一部分(第一章),介绍有历史记录的世界活动火山分布,包括8个板块汇聚带(7个俯冲带和1个大陆碰撞带)、3个大陆区和3个大洋区,介绍了各区、各带的有历史活动的火山500多座,及其所处地区现今构造活动背景。

第二部分(第二章至第五章),介绍4种典型的火山喷发时间过程,包括玄武岩熔岩溢出与喷泉、喷溢-爆炸交替、分阶段的熔岩丘生长与爆发以及集中式爆发4种类型的火山喷发过程的一些典型实例,介绍了17座火山的构造背景、历史喷发过程、各种前兆、对策以及灾害。本书不能涵盖所有火山喷发类型,也无力作出全面系统的概括,只是给出几个喷发类别和一些典型喷发实例,让人们了解实际的火山喷发预警与减灾的漫长、复杂、有时

^①中国地震局2008年,火山监测技术培训班,五大连池。

是惊心动魄的过程。

第三部分(第六章),介绍火山形成的物理化学过程,包括岩浆的产生补给、岩浆囊、围岩破裂与通道的形成以及岩浆喷出的一些基础性的动力学过程。

第四部分(第七、第八章),介绍火山喷发预测与预警,包括火山预测的特征及其主要方法、火山灾害的特征以及国内外的火山灾害预警,包括发达国家和发展中国家的火山预警工作的不同特征以及我国火山预警的初步框架。

我是在刘若新先生带领下,在20世纪90年代开始活动火山研究工作。在刘先生辞去火山负责工作后,负责了2000~2006年中国地震局的火山项目(洪汉净,2006 a.b.c.d)。感谢丁国瑜、马宗晋、刘嘉麒、邓启东院士的教诲,感谢中国地震局火山项目管理人员,特别是吴卫民、孙雄、吴建春、李明、刘桂平。感谢参加火山项目的研究人员,特别是中国地震局地球物理研究所吴建平,中国地震局第二监测中心王庆良,中国地质大学白志达,吉林省地震局郑雅琴、李克、杨清福及长白山火山站全体人员,云南省地震局姜朝松、赵慈平,海南省地震局胡久常,黑龙江地震局赵谊、王晓峰,中国地震局地质所的樊祺诚、魏海泉、上官志冠、刘培洵、于泳、刘辉、陈会仙等。在他们的支持下,我不仅完成了国家项目,而且使我对火山的认识逐渐加深。我的妻子郑秀珍几十年无怨无悔,操持家务,为我提供了潜心钻研的基础,还协助数据整理和做图工作。

衷心感谢他们的真诚帮助!

洪汉净

2012年11月1日

目 录

第一章	世界活动火山分布	1
第一节	西北太平洋俯冲带火山活动区	4
第二节	西南太平洋俯冲带火山活动区	19
第三节	东太平洋俯冲带火山活动区	37
第四节	大陆火山活动区	50
第五节	大洋火山活动区	65
第二章	玄武岩溢流与熔岩喷泉	76
第一节	夏威夷冒纳罗亚火山	77
第二节	夏威夷基拉韦厄火山	80
第三节	非洲尼雅姆拉季拉火山	90
第四节	非洲尼拉贡戈火山	94
第三章	喷溢—爆炸交替的喷发	102
第一节	意大利埃特纳火山	102
第二节	冰岛埃亚菲亚德拉火山	111
第三节	墨西哥科利马火山	118
第四节	印度尼西亚默拉皮火山	123
第五节	菲律宾马荣火山	132
第四章	分阶段的熔岩穹丘生长与爆发	140
第一节	日本云仙岳火山	141
第二节	蒙塞拉特岛苏弗里耶尔火山	146
第三节	墨西哥波波卡特佩特火山	153

第四节	日本北海道有珠火山	158
第五章	集中爆炸式喷发	165
第一节	美国圣海伦斯火山	166
第二节	日本富士山火山	173
第三节	意大利维苏威火山	176
第四节	菲律宾皮纳图博火山	183
第六章	火山的形成	191
第一节	岩浆的产生	192
第二节	岩浆囊	201
第三节	通道形成与岩浆的喷发	208
第七章	火山喷发的预测	216
第一节	火山喷发预测的特征	217
第二节	火山喷发预测方法	225
第三节	火山活动状态	238
第八章	火山灾害的预警	247
第一节	日本和冰岛的火山灾害预警	248
第二节	美国的火山灾害预警	254
第三节	印度尼西亚和菲律宾的火山灾害预警	261
第四节	中国火山灾害预警研究	265
附 录		275
附录 1	火山喷发规模	275
附录 2	火山的形态	276
附录 3	火山喷发类型	277
附录 4	火山活动状态、危险性与应急等级	277
附录 5	岩浆的类型	278
参考文献		279

第一章 世界活动火山分布

全球有历史记录的火山 500 多座 (Smithsonian Institution, 2010), 其中层状火山 329 座, 占 59.3%; 破火山口、复杂与复合火山 (包括外轮山) 79 座, 占 14.2%; 单成因火山 (包括碎屑锥、碎屑盾、凝灰岩锥、火山场、火山渣锥、冰下火山和玛尔湖等) 44 座, 占 7.9%; 熔岩丘与盾状火山 50 座, 占 9%; 海底火山 51 座, 占 9.2%。通常采用火山爆发指数 VEI 来衡量爆炸性火山喷发的大小 (Newhall & Self, 1982), 它主要根据喷发火山碎屑物的体积 (质量) 来衡量, 相邻两级之间喷发体积相差 10 倍 (附录 1)。

火山和地震一样基本上都是板块运动的结果, 是现今地球动力学过程的重要现象 (Press and Siever, 1986; 马宗晋等, 1986)。全球大部分历史活动火山都分布在构造板块边缘 (Simkin and Siebert, 2000), 特别是以聚敛板块边界为主, 其中又以大角度的正面俯冲带的弧后火山活动最强, 当板块运动方向与板块边缘走向成小角度相交时, 缺少正面俯冲的动力, 火山活动较弱。走滑断层的边界上更缺少火山活动。引张板块边缘也较少有显著的火山喷发, 大洋中脊往往只有小规模的宁静溢流, 较大规模的喷发活动往往与热点 (地幔柱) 有关。

地震是岩石的破裂, 严格地讲是断层的黏滑失稳。只有在破裂贯通时才产生失稳和压力降 (马瑾, 1989)。火山是岩浆的喷发, 涉及部分熔融、岩浆运移、围岩破裂、岩浆囊泡化和碎裂化以及失稳爆发等过程 (洪汉净, 2003)。虽然地震与火山具有非常不同的机制, 但它们绝大多数都与板块边界活动有关 (Bird, 2003): 最强烈的地震和火山都发生在俯冲带上。

近年来, 火山与地震之间的关系得到越来越多的重视, 例如 Berryman 等 (2006) 认为新西兰陶波地堑的地壳大断层和 20km 内的大规模流纹岩喷发存在某种耦合关系。Walter and Amelung (2007) 研究了全球四个 9 级大震后的火山喷发, 认为地震引起岩浆系统的减压将会导致火山喷发。

全球地震、火山构造区带的划分, 是研究全球地震、火山等的时空分布特征、研究全球构造以及现今动力学过程的一个重要前提。陈培善等 (1994) 进行了全球地震地理分区。马宗晋等 (2003) 将全球现今活动构造划分为环太平洋、大洋脊和大陆三大构

造系统，并分别论述了它们的运动学和动力学特征。

全球火山在空间分布上不均匀。在纬度上主要火山活动分布在赤道南，北半球低—中纬度圈；在经度上，主要集中在 $100^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 的西太平洋，其次是 $270^{\circ} \sim 290^{\circ}$ 的东太平洋带和 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的意大利附近（洪汉净等，2003）。

火山喷发活动还与当地的重力势有关，全球 18 座 $VEI \geq 5$ 的火山大部分（15 座）位于大地水准面（Geoid）^①异常高区，只有美洲圣海伦斯、圣玛利亚和科希圭那三座火山位于 Geoid 低区（洪汉净等，2003）。重力势正异常可能与高的正压力有关，有利于产生特大喷发。这与正面俯冲带的弧后火山活动最强烈正好相互印证。

马宗晋等（2003）认为环太平洋地震最集中、最强烈，其最大特点是海沟、岛弧和弧后盆地及弧后山带；大洋脊无特大地震和深源地震，强度比其他两个构造系统低；大陆构造系地震活动集中在北半球，沿纬向环带展布，四个大陆地震区的东西半区呈反对称，震源浅，震源机制以水平力为主。三大构造体系的划分为进行全球地震、火山分区和研究现今动力学奠定了重要基础。

洪汉净等（2003）进行了全球火山活动分区，但未应用三大构造系统的概念。为了进一步理解全球地震活动和火山活动的关系，本文在对美国国家地震信息中心地震目录和 Smithsonian 研究所全球火山数据统计研究的基础上，应用三大构造系统的概念进一步研究火山分布与地震分布的关系。在分小区进行统计的基础上，认为可以分为碰撞带、大陆区和大洋区。将全球地震、火山活动分为 8 个板块汇聚带（包括 7 个俯冲带和 1 个大陆碰撞带）、3 个大陆区和 3 个大洋区（图 1.1）。

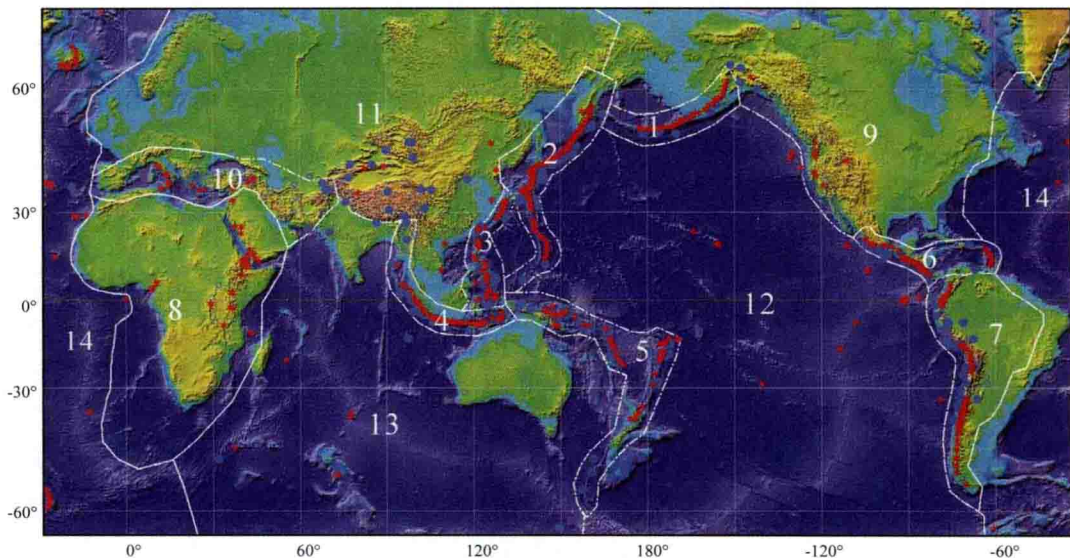


图 1.1 全球火山活动分区图

圆圈为 1900 ~ 2006 年 $M \geq 7$ 地震，实心代表震源深度大于 300km 深震，红色星号表示历史活动火山，数字表示分区，编号见表 1.1（地震目录根据 NEIC，火山目录根据 Smithsonian Institution，2010，下同）

① Ahern, J. L., 2004, EGM96, [Http://Geophysics.Ou.Edu/Solid_Earth/Notes/Geoid/Egm96_Geoid.Jpg](http://Geophysics.Ou.Edu/Solid_Earth/Notes/Geoid/Egm96_Geoid.Jpg)

几乎所有震源深度大于 70km 的地震都位于碰撞带内，唯一例外的区域是南大西洋大洋中脊附近的桑威奇板块内有小于 300km 的中深源地震。大洋区主要地震活动与大洋中脊活动有关，还有相当的远离中脊的强震活动，还包括桑威奇板块的中深源地震。

根据 NEIC 目录统计，全球地震活动所释放的能量中，碰撞带占 81.6%，大陆占 13.3%，大洋区占 5.1%。根据 Fisher 和 Schmincke (1984)，全球喷发的岩浆中，发散的板块边界占 73.2%，聚敛的板块边界占 14.6%，海洋板块内部占 9.8%，大陆板块内部占 2.4%。发散板块边界的岩浆大部分都是平静溢出，既没有伴随破裂与应力释放，也很少有火山喷发。

环绕着太平洋，有一条环形的狭窄的火山和地震活动区域，通称为火环，火环上的活动火山占全球火山的 75% (表 1.1)。火环的概念早在板块理论形成以前就提出了。现在我们知道，火环位于太平洋板块和其他构造板块之间的边界上。板块类似地球表面巨大的筏，经常和邻近的筏互相错过、碰撞，或者插到其他板块之下，我们称之为俯冲。环太平洋大部分是在板块之间的俯冲带上，板块相对运动巨大的能量使岩石熔化，作为熔岩上升到地表而形成火山。

表 1.1 地震火山活动分区、地震能量分布及其特征

编号	火山带名称	历史喷发火山个数	最大 VEI	M_s 地震次数	中深源地震能量	动力学特征
1	阿拉斯加-阿留申	41	6	35	2.3%	太平洋板块向北俯冲
2	堪察加-日本-马里亚纳	112	6	169	18.0%	太平洋板块向西俯冲
3	琉球-菲律宾	50	6	136	19.4%	菲律宾板块向西俯冲
4	巽他	64	7	83	4.8%	印度-澳大利亚板块向北俯冲
5	新几内亚-汤加-新西兰	56	6	289	16.4%	澳大利亚板块向北俯冲
6	墨西哥-尼加拉瓜	45	6	97	6.3%	西面: Cocos 板块向 NE 俯冲, 东面: 大西洋向 W 俯冲
7	南美安第斯	63	6	135	25.2%	纳兹卡板块向东俯冲
8	非洲大陆	35	3 ~ 4	9	-	大陆裂谷, 地震最弱
9	北美大陆	7	5	38	-	胡安德富卡俯冲
10	地中海	17	5	101	7.3%	地中海关闭过程中残留的俯冲带
11	亚洲大陆	8	3	57	-	印度板块推挤和太平洋板块俯冲的联合作用
12	太平洋	28	2	9	-	大洋中地震活动弱
13	印度洋	6	1	15	-	大洋中地震活动最强
14	大西洋	41	6	29	0.5%	大洋中火山活动最强, 北有冰岛, 南有桑威奇和斯科舍

Engdahl 和 Katz (2010) 统计了火环上 35 段火山弧及其所对应的俯冲板片的距离、板块汇聚速度与倾角, 发现大部分 (6/7) 火山之下俯冲板片的温度压力都落在 200 ~ 250 p.p.m. 含水橄榄岩的固相线之上。这里岩石的含水量仅相当于通常认为的湿的熔融的 1/10, 而与弧后盆地之下地幔的含水量相当。这也就是说, 弧后火山的形成不仅仅需要湿岩石的熔融 (这样的区域很大), 而且需要干岩石的熔融。实际上, 地幔楔上形成火山的地点与地幔楔对流的转折部位有关, 那里正是海洋板块下浅层地幔向海沟运动转为背离海沟向下运动的转折点。

第一节 西北太平洋俯冲带火山活动区

西北太平洋俯冲带火山活动区属于太平洋火环, 是世界上现今构造活动及其灾害表现最强烈的地区之一, 这里有非常强烈的地震活动与火山喷发, 历史活动火山数占全球的 26.7%, 7 级以上地震数目占全球的 17.0%。地震活动与太平洋板块向欧亚板块的强烈俯冲和挤压有关, 而火山喷发与俯冲脱水、固相线降低以及岛弧变形有关。可能最重要的是板块碰撞在这里产生巨大的能量, 通过地震和火山表现出来。

一、阿拉斯加-阿留申火山带

这里是太平洋板块北缘的俯冲带, 包括西阿拉斯加与阿留申俯冲带, 震源深度小于 300km。西阿拉斯加弧后为水深小于 300m 的白令大陆架, 而阿留申弧后, 东部亦为白令大陆架, 西半部是阿留申盆地 (Spence, 1977)。与这个俯冲带有关的主要火山链有西阿拉斯加、东阿留申、中阿留申以及西阿留申。而在西阿留申盆地的弧后, 现代火山活动基本缺失。

太平洋北缘俯冲带上的板块汇聚大部分表现为带右旋分量的斜向俯冲, 聚敛角度, 也就是板块聚敛方向与俯冲带法向方向的角度从东端西阿拉斯加的接近 0° 增加到阿留申西端近 90° , 也就是说在阿留申的西端已经变成转换断层 (Avé Lallemant, 1996)。俯冲带的宽度也从西阿拉斯加到西阿留申不断变窄, 乃至消失。由于北缘太平洋板块运动方向与岛弧有一些斜交, 在太平洋周缘的俯冲带中火山活动相对较弱。

阿拉斯加-阿留申火山带全新世以来的活动火山有 80 座, 其中 40 座火山是历史上有喷发记载的 (1760 年以来喷发过的), 最大喷发在万烟谷 (诺瓦拉普塔火山), $VEI=6$ 。近 100 年来, 这里的火山喷发占全美国火山喷发的 2/3。而其中四座最活动的火山——巴甫洛夫 (Pavlof)、阿库坦 (Akutan)、希沙尔丁 (Shihaldin) 和乌姆纳克 (Okmok) 岛火山在 20 世纪就发生了 82 次喷发。

这里地震活动的强度也非常引人注目, 这里虽然没有大于 300km 的深震, 但是却发生了世界上第二大地震 (1964-3-28 威廉王子湾 M_w 9.2) 和第三大地震 (1957-3-9 安德烈诺夫群岛 M_w 9.1), 还有其他几个 8.5 级以上的特大地震 (1929-3-7 M_s 8.6, 1938-11-

$10M_s$ 8.7, 1957-3- $9M_s$ 8.6, 2002-11-3 M_s 8.5)。可见, 不论火山还是地震活动, 都是很强烈的。

(一) 西阿拉斯加火山链

西阿拉斯加火山链长 690km, 位于太平洋板块东北角, 弧后为白令陆架 (图 1.2)。有万烟谷、阿尼亚恰克、奥古斯丁、斯普尔等著名火山, 最大喷发 $VEI=6$ 。



图 1.2 西阿拉斯加火山分布

红色星号代表历史喷发火山, 小圆: $M=7 \sim 7.9$, 大圆: $M \geq 8$

东面是亚库塔特地体, 正是太平洋东缘的右旋走滑转换构造 (如圣安德烈斯断裂) 转向北太平洋俯冲带的复合部位, 亚库塔特地体南缘是一条过渡断层 (Transition fault), 这是一条近于垂直的转换带, 这里莫霍面深度在不到 5km 范围内从亚库塔特大洋台地的 32km 急剧变为太平洋地壳的 11.5km, 然而又没有多少逆冲变形的迹象 (Christeson et al., 2010)。

而在亚库塔特地体西面, 太平洋板块俯冲到北美大陆岩石圈下, 包括阿拉斯加半岛、楚加奇 (Chugach) 以及威廉王子地体 (Prince William Terranes)。由于俯冲倾角非常缓, 海沟不是很清楚, 同时俯冲下去的太平洋板片周围环境温度不太高, 俯冲板片不容易变热, 直到很远才形成火山链。火山弧背后是白令大陆架, 地壳厚度大约 28km (Jin & Herrin, 1980)。

1. 科克湾西部火山

科克湾西部火山大致成 $NE15^\circ$ 排列。这里火山链和板块边界距离特别大, 超过 300km, 最大距离 420km。

最北面的斯普尔 (Spurr) 火山, 阿拉斯加-阿留申弧最高的层状火山, 位于阿拉斯加弧最东端。区域应力场最大主压应力北东向, 近于水平, 只有在火山下的局部地区, 最大主压应力垂直 (Jolly et al., 1994; Roman et al., 2004)。1953 年和 1992 年分别发生 $VEI=4$ 的喷发, 1992 年的三次喷发在其东部 130km 的港口城市安克雷奇及其周围沉积了火山灰, 使机场关闭, 造成地面交通的困难, 甚至使附近的空中运输中断。

南面 100km 的盾堡 (Redoubt) 火山 1989 ~ 1990 年 $VEI=3$ 的喷发造成巨大的经济损失。再向南的伊里亚姆纳 (Iliamna) 层状火山常年冰河覆盖, 1867 ~ 1876 年以及 1952 ~ 1953 年发生 $VEI=2 \sim 3$ 的喷发活动。

再向南, 奥古斯丁 (Augustine) 火山, 是一座位于科克湾奥古斯丁岛上的层状火山与熔岩穹丘, 1976 年和 1986 年都发生了 $VEI=4$ 的喷发。历史上 1540 年和 1883 年也发生过 $VEI=4$ 的喷发。

2. 万烟谷火山群

西阿拉斯加火山链在科克湾南部有一个转弯, 其走向从北面的 $NE15^\circ$ 转成以南的 $NE60^\circ$ 。这里也是火山链和板块边界距离减少的转折点, 以南其距离在 300km 以下。

万烟谷 (Valley of Ten Thousand Smokes) 火山群, 位于奥古斯丁火山西南 150km, 大约 100km^2 的土地上覆盖着 30 ~ 210m 厚的火山碎屑, 这些火山碎屑主要是 1912 年火山喷发产生的, 火山碎屑沉积的表面冒出成千上万的喷气孔。1916 年植物学家 R.F.Griggs 为国家地理学会到这里探测时起的“万烟谷”的名字, 他说: “一眼望去, 整个山谷里充满了烟雾, 成千上万条烟从裂开的土地上袅袅升起” (Griggs, 1922)。为了保护万烟谷自然景观和褐熊等珍贵动物, 1918 年建立卡特迈国家公园。公园内卡特迈 (Katmai)、特里吨特 (Trident) 与诺瓦拉普塔 (Novarupta) 三座火山位于 NW—SE 向万烟谷的东南, 成三角形分布。最初, 人们认为 1912 年喷发是从 2047m 高的卡特迈火山喷出的, 之后又认为是 1864m 高的特里吨特火山喷出的, 近年来终于认识到 1912 年喷发是从 841m 高的诺瓦拉普塔破火山口喷出的。

奥古斯丁火山西南面 70km 的四峰山 (Fourpeaked) 火山, 是卡特迈国家公园东北角的一座被冰河覆盖的层状火山, 一直被认为是休眠火山 (休眠了 1 万年以上), 但是 2006 年发生一次 $VEI=2$ 喷发。

四峰山火山西南 90km 是万烟谷最高的火山卡特迈火山, 1912 发生 $VEI=3$ 喷发。卡特迈火山西南 9km, 特里吨特火山 1913 年后发生了 12 次 $VEI \leq 3$ 的喷发。

特里吨特西北面 5km 的诺瓦拉普塔火山, 1912 年 6 月 6 日至 6 月 9 日的喷发是 20 世纪最大的一次喷发 ($VEI=6$), 喷出的流纹岩火山碎屑相当于 30km^3 的浮岩和火山灰。喷发时伴随着十来个 6 ~ 7 级地震, 喷发后又发生了 100 个 5 级以上地震, 诺瓦拉普塔火山东面 11km 外的卡特迈山顶崩塌了 1200m, 形成了一个 $3\text{km} \times 4\text{km}$ 的中央破火

山口，估计是由于地下岩浆流向诺瓦拉普塔而使卡特迈塌陷的。

3. 阿拉斯加半岛火山

阿拉斯加西南的阿拉斯加半岛，火山成 $NE60^\circ$ 排列。从东到西，火山与海沟的距离从 320km 减少到 200km 左右。历史上发生的喷发都在 $VEI=4$ 以下，然而其中有些火山还是频繁喷发。

(1) 东段紧邻万烟谷的几座火山只有小规模喷发。包括马丁 (Martin) 火山 (1951 年和 1953 年有喷发)、乌金雷克 (Ukinrek) 玛珥湖 (2006 年 $VEI=3$)、乌加希克 (Ugashik-Peulik) 火山 (1814 年, 1852 年发生 $VEI \leq 3$)、奇基那加科 (Chiginagak) 火山 (历史上发生三次 $VEI \leq 3$ 的喷发)。

(2) 中段，阿尼亚克查克 (Aniakchak) 破火山口，公元前 5250 年和公元前 1645 年分别发生了 $VEI=6$ 大喷发，公元 1560 年和 1931 年发生 $VEI=4$ 的喷发。韦尼阿米诺夫 (Veniaminof) 火山，公元前 1750 年发生 $VEI=6$ 喷发，公元 1932 年后有 17 次 $VEI \leq 3$ 喷发。库普列阿诺夫 (Kupreanof) 层状火山 1987 年发生 $VEI=1$ 喷发。

埃蒙斯湖北东的巴甫洛夫 (Pavlof) 火山位于库普列阿诺夫火山西 150km，是一座层状火山，在公元 762 年发生了 $VEI=4$ 的喷发，1900 年后有 30 次喷发，包括 7 次 $VEI=3$ 的喷发。是 1900 年以来阿拉斯加—阿留申火山带上喷发最频繁的火山。巴甫洛夫西面 80km 的阿马克火山 (Amak volcano) 是阿拉斯加半岛北面一座高 488m 的小岛上的层状火山，历史上有过小喷发。

(3) 西段，乌尼马克岛上希沙尔丁 (Shishaldin) 火山，是一座 2857m 高的冰雪覆盖的漂亮的锥形火山，1900 年后有 30 次 $VEI \leq 3$ 的喷发，主要成分是玄武岩，北西坡上散布着几十个碎屑锥，地表覆盖着渣状熔岩流。希沙尔丁火山西面，费希尔 (Fisher) 火山曾经发生过阿留申岛弧上最大的喷发 (公元前 7420 年, $VEI=6$)，后来活动减弱。1826 年、1830 年分别发生了 $VEI=3$ 和 $VEI=2$ 的喷发。乌尼马克岛最西南的韦斯特达尔 (Westdahl) 火山，1795 年发生 $VEI=4$ 的喷发，之后有 7 次 $VEI \leq 3$ 的喷发。

(二) 东阿留申火山链

东阿留申火山链东阿留申火山链位于乌尼马克岛以西，从乌尼马克海峡向西至阿穆克塔海峡，北部弧后为白令大陆架和阿留申盆地东部交接部位 (图 1.3)。火山活动比阿拉斯加火山链弱，最大喷发仅为 $VEI=4$ 。

(1) 东段：最东端的阿库坦 (Akutan) 层状火山 1900 年后有 28 次 $VEI \leq 2$ 的喷发，也是一座喷发非常频繁的火山。乌纳拉斯卡岛西部有一座马库欣 (Makushin) 火山，这座层状火山 1768 年后有 22 次 $VEI \leq 3$ 的喷发。再向西的邦戈斯洛夫 (Bogoslof) 火山是一座仅仅露出山顶的海底火山，1900 年后有 8 次喷发，最大的是 1906 年和 1992 年的 $VEI=3$ 的喷发。

(2) 乌姆纳克岛：乌姆纳克岛东北端的奥克莫克 (Okmok) 火山是一座宽阔的玄武岩盾状火山，公元前 100 年有过一次 $VEI=6$ 的喷发，1900 年后有 11 次喷发，其中最