

Cenozoic Volcanoes And Pyroclastic Deposits In Northeastern China
Resources And Hazards

中国东北地区新生代 火山和火山碎屑堆积物 资源与灾害

刘 祥 向天元 著

吉林大学出版社

国家自然科学基金资助项目 (49372127)

中国东北地区新生代 火山和火山碎屑堆积物 资源与灾害

刘 祥 向天元 著

吉林大学出版社

内 容 提 要

本书是系统研究中国东北地区新生代火山、火山喷发碎屑堆积物(火山喷发空中降落堆积物、火山碎屑流状堆积物、火山泥流堆积物和火山基浪堆积物)及其资源和灾害的专著。研究地区涉及长白山地区,龙岗火山群,五大连池、二克山火山群,沿敦化—密山断裂带和伊通—依兰断裂带的火山群等。

本书可供从事火山(包括前新生代火山)学、火山地震灾害、区域地质调查、岩石学、沉积学、第四纪地质地貌学、矿产地质、旅游地质、水文地质和土壤学等教学、科研、生产人员参考和使用。

中国东北地区新生代火山和火山碎屑堆积物 资源与灾害

刘 祥 向天元 著

责任编辑、责任校对:崔晓光

封面设计:张沐沉

吉林大学出版社出版
(长春市东中华路 37 号)

吉林大学出版社发行
吉林省劳动印刷厂印刷

开本:787×1092 毫米 1/16

1997 年 5 月第 1 版

印张:10.875 插页:2

1997 年 5 月第 1 次印刷

字数:260 千字

印数: 1—500 册

ISBN 7-5601-2022-9/P·23

定价:25.80 元



刘祥教授在新西兰梅西大学

Professor Liu Xiang was at Massey University of NEW ZEALAND as a visiting scientist from 1991 to 1992.

第一作者简介

刘祥，1942年6月生，黑龙江省海伦市人。长春地质学院教授。

1965年毕业于长春地质学院，并考取为本院研究生，因文革中断（毕业证书1982年补发），1979年再次考取为本院研究生，1982年获硕士学位。近年来，在新生代火山学研究方面成果突出，主持完成国家自然科学基金等项目多项。1991年—1992年，受国家教委选派，以高级访问学者身份赴新西兰梅西大学进行学术访问，考察那里的第四纪火山喷发碎屑堆积物及其灾害；1995年对韩国第四纪火山及火山碎屑堆积物作短期考察。发表论文30余篇，专著一部（合著）。1993年被聘为中国第四纪研究委员会委员，同年被选为中国火山学会理事，1995年被审批为中国矿物岩石地球化学学会火山与地球内部化学专业委员会委员。



本书第一作者随新西兰梅西大学 V. E. Neall (Professor, Massey University, New Zealand) 教授观察新西兰埃格蒙特火山 (Egmont Volcano, New Zealand, 2518m) 的火山碎屑流状堆积物 (pyroclastic flow deposits) 和火山泥流堆积物 (lahar deposits)。



目击新西兰怀特岛 (White Island Volcano, New Zealand) 火山爆发, TV1 号火山口正在喷灰、喷气 (左前第一人为本书第一作者, Liu Xiang, first left)。



本书第一作者（左三，Liu Xiang, second right）随美国地质调查所 T. C. Pierson (Research Hydrologist, U. S. Geological Survey, first left) 博士等观察新西兰鲁阿佩胡火山 (Ruapehu Volcano, New Zealand, 2797m) 的火山泥流堆积(下部) (lahar deposits, lower part) 和空落堆积 (airfall tephra)。



本书第一作者 (Liu Xiang, first right) 随元钟宽 (Professor Won Chong Kwan, Kang Won National University, South Korea, second left) 教授(左二)观察韩国济州岛 (Cheju Island, South Korea) 海岸的水成火山碎屑堆积 (hydroclastic deposits), 左三为孙运生教授, 院长, 左一为刘若新教授, 理事长。

序

岩石学家们早已注意到火山碎屑岩在研究古火山作用及有关的成岩成矿作用过程中的重要地位，这特别表现在对中国东部中生代火山岩研究的一系列论著中。但是从火山学角度研究新生代，特别是近代火山喷发所形成的碎屑堆积物，则还是近几年来才日益引起重视。这是因为由不同成因类型火山碎屑堆积的分布、组成、相结合、粒度变化及其它物理参数，可以恢复火山喷发的类型、规模及物理过程。对于那些具有潜在喷发可能的休眠火山来说，全新世以来该火山最大一次喷发形成的火山碎屑堆积物的上述参数，还将成为该火山区未来火山灾害预测的主要依据。实际上，不同成因类型火山碎屑堆积物，已经成为当代物理火山学的主要研究对象。

刘祥教授等在对东北地区新生代火山碎屑堆积物进行全面而系统地研究过程中，尤其重视对长白山天池火山和龙岗火山群中第四纪火山碎屑堆积物的研究。注意到火山碎屑堆积物可作为资源开发利用的有利方面，更强调其对未来可能的火山灾害预测预防方面的重要意义。本书是刘祥教授等在东北地区新生代火山碎屑堆积物研究方面多年辛勤劳动的结晶，也是我国火山学研究近年来取得的重要进展之一。我深信，本书的出版，定会推动我国火山事业的发展。

刘若松

1996年6月6日 北京

前 言

火山喷发是壮丽的自然现象。不仅当代，自史前开始，就已经引起人们的关注。一方面，火山喷发能给人类带来许多好处；另一方面，火山喷发也能造成巨大的灾害。由此，才给火山、火山喷发研究提供了一个主要原动力。

本书是第一部系统研究中国东北地区新生代火山、火山喷发碎屑堆积物（火山喷发空中降落堆积物、火山碎屑流状堆积物、火山泥流堆积物和火山基浪堆积物）及其资源和灾害的专著。

本书也是中国第一部系统研究新生代火山喷发碎屑堆积物（火山喷发空中降落堆积物、火山碎屑流状堆积物、火山泥流堆积物和火山基浪堆积物）及其灾害的专著。

1989年，我们承担了地矿部地质行业科学技术发展基金项目，“东北地区新生代火山喷发碎屑堆积物及矿产、环境意义研究”课题，刘祥任项目负责人。旨在研究东北地区新生代火山喷发空落堆积物、火山基浪堆积物和火山碎屑流状堆积物以及与火山碎屑堆积物有关的矿产、旅游资源和未来火山爆发对环境的影响等。

在项目执行后期阶段，刘祥受国家教委选派，以高级访问学者身分于1991年—1992年赴新西兰梅西大学进行学术访问，考察处于环太平洋火山地震带最南端新西兰的第四纪火山喷发碎屑堆积物，获取了大量信息和资料。并随其指导者，国际知名火山学家 V. E. Neall 教授（新西兰5名火山学家获得美国地质学会 research fellow 殊荣，Neall 是其中之一）一起，在野外考察了著名的陶波（Taupo）火山、鲁阿佩胡（Ruapehu）火山、埃格蒙特（Egmont）火山、塔拉韦拉（Tarawera）火山等（全和长白山火山一样规模）的火山泥流堆积物、火山碎屑流状堆积物、火山空落堆积物和火山崩塌等。其中有3天时间和美国地质调查所国际著名火山泥流专家 T. C. Pierson 博士（他在美国圣·海伦斯火山、哥伦比亚 Nevado del Ruiz 火山和菲律宾皮纳图波火山均从事过火山泥流研究）一起观察了鲁阿佩胡（Ruapehu）火山（海拔2796 m）的火山泥流堆积。1992年2月20日和参加新西兰全国火山灾害会议的代表乘船前往怀特岛火山考察时，怀特岛火山再次突然爆发，目击了喷发的全过程（喷发柱高4000余米），冒险饱览了正在喷灰吐雾的火山口（规模相当五大连池火山群老黑山火山），拾到余热未尽的火山弹，千载难逢，终生难忘。这些野外观察，大大开阔了眼界，掌握了不同成因类型火山碎屑堆积物的识别标志。百闻（读）不如一见，这对随后回国对长白山火山泥流、火山碎屑流状堆积物的研究起了决定性作用。此外，在新西兰考察时，火山碎屑堆积物所造成的灾害也留下了深刻印象。

1993年，我们向国家自然科学基金委员会申报了“东北地区第四纪火山喷发碎屑堆积物及其灾害研究”的课题，并获批准，刘祥任项目负责人。因此本书汇总了国家自然科学基金项目（49372127）和地矿部地质行业科学技术发展基金项目（88099）的研究成果。

1995年10月刘祥又随我院院长孙运生教授和林强教授等参观、考察了韩国济州岛等地的第四纪火山和火山碎屑堆积物，获得了周边国家研究第四纪火山碎屑堆积物的最新信息。

中国东北地区新生代火山 510 余座，绝大多数由火山喷发碎屑堆积物组成，只是爆发指数不同而已，而完全由熔岩组成的火山很少。我们首次将这些火山喷发碎屑堆积物系统地划分为：火山喷发空中降落堆积物、火山碎屑流状堆积物、火山泥流堆积物和火山基浪堆积物并加以研究。重点研究了长白山火山 1000 年前爆发的火山空落堆积物、火山碎屑流状堆积物和火山泥流堆积物；龙岗火山群大椅子山火山、五大连池火山群老黑山火山空落堆积物；龙岗火山群大龙湾火山和龙泉龙湾火山的火山基浪堆积物，同时兼顾了其他火山群及火山。通过大量的野外地质调查和室内工作，研究了这些火山碎屑组成的火山地貌景观；火山碎屑堆积物的分布方位、分布范围和分布形态；距离火山口远近不同距离厚度变化规律；研究了这些火山碎屑堆积物的层理、粒序层等构造特征及变化规律；火山碎屑粒度参数（最大平均粒径、中值粒径、分选系数、峰度和偏态等）的分布、变化规律；估算不同类型火山喷发碎屑的量；确定火山喷发类型和火山活动时代；火山碎屑的岩石、矿物特点；探讨不同火山喷发碎屑堆积物形成机制和火山活动机制和规律。详细研究了与火山碎屑堆积物有关的矿产资源的类型、质量、分布规律和旅游资源及保护区。

当前正值国际减灾 10 年（1990—2000 年），然而中国的火山灾害以往是被忽略的。长白山火山 1000 年前的爆发，火山灰向东一直飘到日本，超过 1000 km。根据我们的研究，这次火山爆发的火山泥流沿松花江而下，越过丰满电站，超过 360 km。如果长白山火山再次发生 1000 年前规模的爆发，造成的灾难性灾害是不堪设想的。松花江中上游的白山、红石、丰满大坝将受到火山泥流的巨大冲击，沿江两岸城、镇、乡村将遭受严重破坏。我们首次编制了长白山火山碎屑流、火山泥流和空落堆积物灾害预测图。并告诉人们在将来火山一旦再次爆发的紧急情况下，将采取什么样的应急措施，把生命财产的损失减少到最低限度。此外，五大连池火山群老黑山、火烧山火山于 1719—1721 年喷发，是著名的活火山；龙岗火山群中的一些火山，1500 年前也有喷发活动，均应该防范火山空落堆积物和火山基浪堆积物灾害。

全书由刘祥执笔，向天元教授参加部分野外工作并负责岩、矿鉴定，刘松雪负责粒度分析数据处理和成图，隋维国、黄亦群和王锡魁参加部分野外工作。

研究工作是在长春地质学院科研处领导下进行的。作者要特别感谢国家地震局地质研究所所长、中国火山学会理事长刘若新教授和中国火山学会副理事长、中国科学院地质研究所所长刘嘉麒教授，没有他们的支持，不会有本书问世。

感谢中国火山学会理事长刘若新教授在百忙中为本书作序。

作 者

1996.5

目 录

第一章 火山喷发碎屑堆积物的主要类型及中国东北新生代火山、

火山碎屑堆积物分布..... 1

1. 火山喷发空中降落堆积物 1
2. 火山碎屑流状堆积物 2
3. 火山泥流堆积物 4
4. 火山基浪堆积物 5
5. 中国东北新生代火山及火山碎屑堆积物分布 7

第二章 长白山区新生代火山、火山碎屑堆积物及火山熔岩..... 8

1. 马鞍山期 [$\beta(E_3-N_1)$] 8
2. 甌峰山期 (βN_1) 8
3. 长白期 (βN_1^2) 9
4. 望天鹅期 (βN_1^3) 9
5. 沿江村期 (βN_1^{3-1}) 11
6. 红头山期 (τN_1^{2-2}) 12
7. 军舰山期 ($\beta(N_2-Q_2)$) 13
8. 红土山子期 (βQ_1) 15
9. 图们江期 (βQ_1^2) 16
10. 龙头山期 (βQ_1^3) 16
11. 板石河期 (βQ_1^4) 18
12. 白头山期 (τQ_1^1) 18
13. 老虎洞期 (βQ_1^2) 20
14. 广坪期 (βQ_1^3) 21
15. 气象站期 (τQ_1^4) 22
16. 十九公里期 (τQ_1^5 或 τQ_1^6) 25
17. 赤峰期 (τQ_1^{5-1}) 和园池期 (τQ_1^{5-2}) 27
18. 有历史记载的喷发 27

第三章 长白山火山 1000 年前爆发火山喷发碎屑堆积物..... 28

1. 赤峰期 (τQ_1^{5-1}) 30
 - 1.1 赤峰空落浮岩层 (CP) 30
 - 1.2 长白火山碎屑流层 (CF) 32
 - 1.3 二道白河火山泥流层 (EL) 47
2. 园池期 (τQ_1^{5-2}) 65
 - 2.1 园池空落浮岩火山灰层 (YP) 66
 - 2.2 冰场火山碎屑流层 (BF) 71

第四章 龙岗火山群火山及火山碎屑堆积物	83
1. 龙岗火山群火山活动分期	83
2. 大椅子山火山喷发空中降落堆积物	86
3. 大龙湾火山凝灰环 (tuff ring) 基浪 (base surge) 堆积物	94
4. 龙泉龙湾火山凝灰环 (tuff ring) 基浪 (base surge) 堆积物	100
5. 大瓮圈火山岩浆蒸气喷发碎屑堆积物	105
第五章 五大连池火山群火山和火山碎屑堆积物	106
1. 五大连池火山群	106
2. 老黑山火山	106
3. 火烧山火山	113
第六章 二克山火山群火山及火山碎屑堆积物	114
第七章 敦化—密山断裂带火山及火山碎屑堆积物	117
1. 温春火山群	117
2. 杏山火山群	120
3. 林口县马鞍山火山	121
第八章 伊通—依兰断裂带火山及火山碎屑堆积物	123
第九章 中国东北新生代火山矿产及旅游资源	128
1. 非金属矿产资源	128
2. 矿泉水资源	130
3. 土壤资源	130
4. 旅游资源及保护区	130
第十章 中国东北火山、火山碎屑堆积物灾害	133
1. 长白山火山灾害	133
1.1 长白山火山是休眠火山	133
1.2 长白山火山具有潜在喷发危险	134
1.3 长白山火山碎屑流灾害	135
1.4 长白山火山泥石流灾害	136
1.5 长白山火山空落火山碎屑灾害	139
1.6 长白山火山熔岩灾害	141
2. 五大连池火山群火山灾害	142
3. 镜泊湖—牡丹江火山群火山灾害	142
4. 龙岗火山群火山灾害	142
英文摘要	143
参考文献	156

Contents

Chapter 1 Main Types of Pyroclastic Deposits and Distribution of Cenozoic Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Northeastern China	1
1. Fallout Tephra	1
2. Pyroclastic Flow Deposits	2
3. Lahar Deposits	4
4. Base Surge Deposits	5
5. Distribution of Cenozoic Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Northeastern China	7
Chapter 2 Cenozoic Volcanoes, Pyroclastic Deposits and Volcanic Lava in Changbaishan Mountains	8
1. Maanshan Episode [β (E_3-N_1)]	8
2. Zhenfengshan Episode (βN_1^1)	8
3. Changbai Episode (βN_1^2)	9
4. Wangtiane Episode (βN_1^3)	9
5. Yanjiangcun Episode (βN_2^{1-1})	11
6. Hongtoushan Episode (τN_2^{1-2})	12
7. Junjianshan Episode (β (N_2-Q_1))	13
8. Hongtushanzi Episode (βQ_1^1)	15
9. Tumenjiang Episode (βQ_1^2)	16
10. Longtoushan Episode (βQ_1^3)	16
11. Banshihe Episode (βQ_1^4)	18
12. Baitoushan Episode (τQ_1^1)	18
13. Laohudong Episode (βQ_2^1)	20
14. Guangping Episode (βQ_3^1)	21
15. Qixiangzhan Episode (τQ_3^1)	22
16. Shijiugongli Episode (τQ_4^1 or τQ_4^2)	25
17. Chifeng Episode (τQ_4^{1-1}) and Yuanchi Episode (τQ_4^{2-2})	27
18. Eruptions in Historic Period	27
Chapter 3 Pyroclastic Deposits of the 1000a B. P. eruption of Changbaishan Volcano	28
1. Chifeng Episode (τQ_4^{1-1})	30
1.1 Chifeng Plinian Pumice Fall Deposits (CP)	30
1.2 Changbai Pyroclastic Flow Deposits (CF)	32
1.3 Erdaobaihe Lahar Deposits (EL)	47
2. Yuanchi Episode (τQ_4^{2-2})	65
2.1 Yuanchi Plinian Pumice and Ash Fall Deposits (YP)	66

2. 2 Bingchang Pyroclastic Flow Deposits (BF)	71
Chapter 4 Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Longgang Volcanic Swarm	83
1. Episodes of Volcanism in Longgang Volcano swarm	83
2. Fallout Tephra Deposits in Dayizishan Volcano	86
3. Base Surge Deposits in Dalongwan Tuff Ring	94
4. Base Surge Deposits in Longquanlongwan Tuff Ring	100
5. Phreatomagmatic Eruption Deposits in Dawengquan Volcano	105
Chapter 5 Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Wudalianchi Volcanic Group	106
1. Wudalianchi Volcanic Group	106
2. Laoheishan Volcano	106
3. Huoshaoshan Volcano	113
Chapter 6 Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Erkeshan Volcanic Group	114
Chapter 7 Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Dunhua—Mishan Fault Zone	117
1. Wunchun Volcanic Group	117
2. Xingshan Volcanic Group	120
3. Maanshan Volcano in Linkou County	121
Chapter 8 Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Yitong—Yilan Fault Zone	123
Chapter 9 Cenozoic Volcanic Mineral Resources and Tourism Resources	
in Northeastern China	128
1. Nonmetal Mineral Resources	128
2. Mineral Water Resources	130
3. Soil Resources	130
4. Tourism Resources and Preservable Areas	130
Chapter 10 Hazards of Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Northeastern China	133
1. Changbaishan Volcano Hazards	133
1. 1 Changbaishan Volcano is a Dormant Volcano	133
1. 2 Changbaishan Volcano Possesses Potential Eruption Dangers	134
1. 3 Changbaishan Volcano Pyroclastic Flow Hazards	135
1. 4 Changbaishan Volcano Lahar Hazards	136
1. 5 Changbaishan Volcano Fallout Tephra Hazards	139
1. 6 Changbaishan Volcano Lava Hazards	141
2. Wudalianchi Volcanic Group Volcano Hazards	142
3. Volcano Hazards in Jingbohu—Mudanjiang Volcanic Group	142
4. Volcano Hazards in Longgang Volcanic Swarm	142
Abstract	143
References	156

第一章 火山喷发碎屑堆积物的主要类型及 中国东北新生代火山、火山碎屑堆积物分布

近些年来,特别是1980年美国圣·海伦斯火山爆发后,对新生代火山喷发碎屑堆积物(pyroclastic deposits 或 pyroclastic rocks)的研究在国际上受到越来越广泛的重视。“火山喷发碎屑”一词,不仅具有粒度上的涵义,而且按形成方式大体分为火山喷发空中降落堆积物、火山碎屑流状堆积物、火山泥流堆积物和火山基浪堆积物等。

火山喷发碎屑堆积物本身是重要的非金属矿产,并形成独特的土壤资源。不同成因类型的火山喷发碎屑堆积物形成奇特的火山锥、火口湖等,是观光、旅游、科考圣地和保护区。以火山喷发碎屑堆积物为标志层的第四纪编年史的研究,全球性大气环流变迁史的研究,火山灰对气候、环境的影响都有重要意义。

据 Fisher 和 Schmincke(1984),1500—1914 年间,陆地上火山喷发碎屑堆积物的量为 328 km^3 ,而熔岩量为 64 km^3 。可想而知,新生代火山喷发碎屑堆积物在新生代火山岩总量中占相当大的比例。而且造成了比熔岩大得多的难以估量的火山灾害,据 Blong(1984),1900—1982 年间,全世界死于各种火山熔岩的 85 人,占火山灾害死亡人数的 0.2%,死于各种火山喷发碎屑堆积物的 46 244 人,占 88.5%。而 1985 年哥伦比亚 Nevado del Ruiz 火山爆发和 1991 年菲律宾皮纳图波火山爆发,由火山泥流造成的严重灾害,更引起人们的广泛关注。

1. 火山喷发空中降落堆积物

火山喷发空中降落堆积物 (airfall tephra) 包括火山爆发时,从火山口喷向空中的所有产物。依其成因,这些产物既可以是原生岩浆的 (juvenile 或 essential) 即直接起源于喷发岩浆;也可是同源的 (cognate 或 accessory),即这些碎屑是同一火山共同岩浆源先前喷发的产物;另外就是含有外来的成分 (accidental)。按粒度大小主要分三级:火山灰 (ash),粒径小于 2 mm,固结后称凝灰岩 (tuff);火山砾 (lapillus),2—64 mm,固结后称火山砾岩 (lapillistone);火山岩块 (block) 和火山弹 (bomb),大于 64 mm,固结后称火山集块岩 (agglomerate) 和火山角砾岩 (breccia) (Fisher and Schmincke, 1984)。

火山渣和浮岩是常用的两个术语。部分取决于火山碎屑的孔隙度。它们并无粒级大小的涵义,但最常见的是用于火山砾或更大的粒级。浮岩 (pumice) 通常指白色或灰色的富硅质火山玻璃,呈泡沫状,常能浮在水面。火山渣 (scoria 或 cinders) 则指富铁镁质成分,高度膨胀气孔化的原生岩浆火山碎屑。Fisher 和 Schmincke(1984)称,浮岩也可以指铁镁质成分。

火山喷发空落堆积物在大气中广泛散布。主要取决于火山爆发的规模,即喷发柱的高度,以及优势风向和风速。主要在斯通博里 (Strombolian) - 普林尼 (Plinian) 式火山爆发中,形成由固体和气体组成的垂直或近于垂直地表的喷发柱,这种以对流羽的形式扩散的喷发柱可连续升高,最高可达 45 km。火山弹、岩块和较粗的火山砾,具有较大的降落速度,被火山自身的能量抛出以后,遵循弹道轨迹很快降落下来,形成火山锥。而较细较轻的碎屑,裹挟在喷发云的湍流悬浮中,被优势风向推动,扩散得很高很远,当喷发云中的能量耗减的时候,依其沉降速度大小先后降落下来,形成火山碎屑席 (图 1-1)。如果火山碎屑降落

速度与风的强度相比小得多的话,火山尘埃可绕地球好多圈,引起日照和气候变化。因而空落堆积物分布的几何形态、粒度反映了喷发柱高度、排出速度和大气中风的方向。如长白山火山在1000年前爆发,火山灰被西风吹拂,一直飘落到日本,超过1000 km,因而是迄今为止世界上最大的火山喷发之一 (Machida and Arai, 1983)。



图 1-1 1958 年 12 月 5 日日本 Asama 火山喷发,可以看出火山碎屑颗粒从湍流喷发柱中降落
(据 Fisher and Schmincke, 1984)

Fig. 1-1 Eruption of Mt. Asama, Japan (December 5, 1958) illustrating fallout of particles from a turbulent eruption column

火山喷发空落堆积物通常铺天盖地而下,覆盖所有地形。这是辨认空落堆积物特征之一,也是空落堆积物在分布上与火山碎屑流状堆积物、火山泥流堆积物的主要区别。

富硅质的或者中性岩浆成分的空落堆积物比富镁铁质的空落堆积物扩散得更远,这是由于前者常出现更大规模的亚普林尼式、普林尼式和超普林尼式火山爆发,有更高的喷发柱和更快的排出速率,形成浮岩空落堆积物;伴随形成大的复式火山。富镁铁质火山爆发往往形成玄武质—玄武安山质火山渣空落堆积物 (scoria fall deposits) 组成的火山渣锥、及火山碎屑席及熔岩流。这是斯通博里式和部分夏威夷式 (Hawaiian) 火山喷发活动所具有的特点。

空落堆积物发育面状平行层理和递变层理,分选性较好,Inman 分选系数常介于 1.0—2.0 之间。空落堆积物的厚度、中值粒径和最大平均粒径都随远离火山口而呈规律性减小 (Fisher and Schmincke, 1984, 刘祥和王锡魁, 1991)。

中国东北、华北、云南腾冲、广东和海南雷琼地区等各火山群普遍发育火山喷发空落堆积物。

2. 火山碎屑流状堆积物

火山碎屑流状堆积物 (pyroclastic flow deposits), 是高温的充满气体的火山物质的碎片沿

地表的流动,特别是沿河谷和低地流动。Fisher 和 Schmincke (1984) 认为,火山碎屑流是“火山成因的,炽热的气体的颗粒密度流”; Neall (1991) 认为,火山碎屑流“通常是指急速膨胀的炽热的火山气体在流体化物态下沿河谷和地表面搬运颗粒。”这是 100 年来 (1868 年始) 使火山学家困惑的岩石,因其某些类型兼有熔岩流和火山碎屑堆积物的特点 (Fisher and Schmincke, 1984)。1868 年 Von Fritsch 和 Reiss 认为加那利群岛的某些凝灰岩是由流动侵位形成,称之为“条纹斑杂岩 (eutaxites)”,这是火山碎屑流状堆积物很有见解的最早描述;随后 (1882 年) 又有 Abich 独立命名的凝灰熔岩 (tufolavas)。关于火山碎屑流的某些详尽描述来自著名的 1902 年的培雷火山喷发,这些描述在火山文献中被称为里程碑式的,如 1904 年 Lacroix 的炽热云 (nuée ardente) 至今仍被应用。新西兰著名火山学家 Marshall (1935 年) 首先觉察出像熔岩的火山碎屑岩,他称为 ignimbrite (熔结凝灰岩),以及随后 (1938 年) Gilbert 的 welded tuff (熔结凝灰岩) (Fisher and Schmincke, 1984),这些与 nuée ardente 一起都是火山碎屑流及其堆积物较早期的至今亦很有影响的其他称谓。

火山碎屑流沉积由晶体、火山玻璃碎片、浮岩、火山渣 (富镁铁质成分) 和岩屑组成,含量比例变化很大,取决于岩浆成分和流的成因。常含炭化木;一般是块状的和分选差,分选系数 $\sigma_s \geq 2.0$,粗颗粒中发育递变层理。可出现许多流单位 (每个流单位被看作是单一火山碎屑流的沉积) 叠加在一起。

火山碎屑流状堆积物有多种不同的形成机制,其中主要有两种类型。一种是熔岩穹丘垮塌 (lava dome collapse),形成块灰流 (block and ash flows)。这种块灰流堆积由细的火山灰基质和粗大的一般无气孔的同源岩屑混杂在一起组成,岩屑直径最大可达 5 m (Cas and Wright, 1987)。刘祥在新西兰进行学术访问时,在野外见到过这种块灰流堆积,它属火山碎屑流成因的重要标志之一是含炭化木。也有将这种块灰流称为熔岩碎屑流 (lava debris flow)、热崩塌 (hot avalanches) 和炽热云 (nuée ardentes) 等,规模通常比较小。另一种是火山喷发柱垮塌 (eruption column collapse),垂直的满载火山灰和火山碎屑的喷发柱的有效密度大于大气的有效密度,于是导致重力垮塌 (gravitational collapse),产生火山碎屑流 (图 1-2)。也有人称之为炽热云或火山碎屑崩塌等。大部分浮岩流和灰流 (火山灰粒级含量 $> 50\%$) 即形成于此。对于浮岩流, Cas 和 Wright (1987) 称



图 1-2 1968 年菲律宾马荣火山爆发,由喷发柱垮塌形成的炽热云
(据 Fisher and Schmincke, 1984)

Fig. 1-2 Nuée ardente from the 1968 eruption of Mayon Volcano (Philippines). Origin by column collapse

之为 ignimbrite, 是典型的分选差、块状构造、含有不同量的火山灰、圆状火山砾和岩块的沉积。在许多流单位中, 大的浮岩碎屑具逆递变层理, 而岩屑则具正递变层理。在流单位的底部可发育细粒基部层。从几千米高处连续的普林尼式的喷发柱垮塌, 可形成大规模的广布的浮岩流席, 覆盖除了高地以外的全部地形。长白山火山 1000 年前的爆发, 环绕火山口形成分布广泛的浮岩流沉积 (Liu Xiang, 1991)。Cas 和 Wright (1987) 认为, 最近一些年过于强调火山喷发柱垮塌在浮岩流形成中的作用, 并认为在火山口处的急促杂乱爆炸 (spluttering) 或者起泡沫 (frothing) 可能起更重要的作用。

另外一种类型的火山碎屑流状堆积物-火山渣流 (scoria flow) 沉积, 也可能形成于火山喷发柱垮塌。火山渣流沉积是由地形控制的、未分选的沉积, 含有不同含量的玄武质到安山质火山灰、气孔状火山砾和直径可大到 1 m 的渣状、绳状表面的火山碎屑 (Cas and Wright, 1987)。这种玄武质成分只能形成小规模火山碎屑流; 面长英质的钙碱性和碱性岩浆, 英安质-流纹质-粗面质-碱流质成分火山喷发, 可形成大规模的火山碎屑流沉积。

此外, 常发现薄的成层的浮岩和火山灰沉积伴随火山碎屑流状堆积物一起出现, 它们是火山碎屑浪 (pyroclastic surge) 沉积。当出现在流单位基部时, 称为底浪 (ground surges), 出现在流单位顶部时, 称为灰云浪 (ash cloud surges)。底浪被认为是火山碎屑流的前驱, 居于流的前面, 它可以由垂直喷发柱边部的垮塌或在火山碎屑流前部裹挟进气体面成等。灰云浪是火山碎屑流上驮气体和火山灰中的湍流状、低密度流。灰云浪起源于运动的火山碎屑的顶部的淘洗 (elutriation) 作用或者在流动中, 较粗颗粒从细颗粒物质的重力分离作用 (Fisher and Schmincke, 1984)。

火山碎屑浪沉积发育面状层理, 微弱波状层理, 低角度交错层理, 并含有透镜状沉积。比伴生的火山碎屑流沉积粒度更细, 分选更好, 富晶屑和岩屑。

3. 火山泥流堆积物

火山泥流 (lahar) 堆积物, 是起源于火山的奔腾流动的火山岩石碎屑和水的混合物。火山泥流的性状不同于正常河流, 类似于流动的混凝土。火山泥流粘度低, 易受地形影响, 常沿河谷和低地急驰 (图 1-3)。1877 年厄瓜多尔 Cotopaxi 火山喷发, 火山泥流沿河谷前进 320 km。在近火山口附近, 火山泥流剥蚀和铲刮陡坡上的下伏的松软物质, 并将其裹挟到火山泥流中。火山泥流的速度取决于流的密度、量和坡降。火山泥流最高流速可达每小时 180 km, 在低坡降地段, 也可达每小时 20—40 km。火山泥流的排泄速率可达 100 000 m³/s, 相当亚马逊河的瞬时排放量 (Neill, 1976)。

Lahar (火山泥流) 一词起源于印度尼西亚语, 1922 年由 Escher 第一次引入英语文献中。直到 1949 年 Van Bemmelen 给予印度尼西亚语 lahar 一个更为精确的定义, lahar (火山泥流) 是“主要由火山成因的含有碎屑和棱角状岩块的泥流 (mudflow)。”1964 年 Beverage 和 Culbertson 将火山泥流分为 mudflows (debrisflows) [泥流 (碎屑流)] 和 hyperconcentrated streamflows (超高密集流)。在碎屑流中 (debris flows) 固体物质含量超过 80% (按重量) 或超过 60% (按体积); 在超高密集流中固体物质含量 40—80% (按重量) 或 20—60% (按体积) (Scott, 1988)。

在火山泥流中, 很少发现有高温的证据, 侵位的温度一般 40—50—100 °C。