

火山活动与辽西四合屯脊椎动物集群死亡关系的初步研究*

郭正府¹ 汪筱林²

GUO ZhengFu and WANG XiaoLin

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

2001-03-13 收稿, 2001-07-03 改回.

Guo ZF and Wang XL. 2002. A study on the relationship between volcanic activities and mass mortalities of the Jehol vertebrate Fauna from Sihetun, western Liaoning, China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1):117-125

Abstract Many of the vertebrate fossils have been found in recent years in Sihetun, western Liaoning, China, including *Confuciusornis*, *Liaoningornis*, as well as “feathered” theropod dinosaurs, etc. The layers of well-preserved vertebrate fossils indicate mass mortalities and rapid burial of the animal bodies in the lacustrine environment, which are coexisting with the intermediate-acidic tuffs (or ashes) in the field. This paper determined the volatile contents of inclusions in phenocrysts and matrix glasses, applying the method of electron microprobe analysis, from the tuffs and ashes coexisting with four typical fossil layers of the well-preserved vertebrates. The result shows that their contents of volatile emitted are higher than those erupted from other volcanoes with same compositions worldwide and the compositions of volatiles released into atmosphere are different, corresponding to the different fossils layers in this area. The authors thought that the mass mortality events in west Liaoning are mainly due to the significant effect of the volatiles and the volcanic dust on climate at that time.

Key words Volcanic activities, Mass mortality, H₂SO₄ aerosol, Ozone layer, Sihetun

摘要 近年来在辽西北票四合屯发现了大量的早期鸟类及“长毛”的小型兽脚类恐龙化石层,完美的化石形态表明本区发生过多次非正常生物集群死亡事件。化石层与火山凝灰岩层(或火山灰)密切共生在一起。本文选择了其中四个化石数量巨大的脊椎动物化石层,对其中凝灰岩(或火山灰)中的火山玻璃及斑晶矿物内原生岩浆包裹体的挥发分成分进行了电子探针测定。研究结果表明,与世界相同成分的其他火山相比,本区火山喷出气体的含量较高;火山喷出的各种气体(HCl、HF、H₂S、SO₂、SO₃和H₂O蒸汽)的组成比例不同,对应着化石层内脊椎动物化石组合也存在差异。作者认为,火山喷出的气体及火山灰(尘)的综合气候效应是造成本区生物集群死亡的重要原因。

关键词 火山活动; 集群死亡; 硫酸气溶胶; 臭氧层; 四合屯

中图法分类号 P317.3

近年来,我国古生物学者在辽西北票四合屯及周边地区热河群义县组下部的湖相沉积夹层中,发现了保存完美的早期鸟类化石、“长毛”恐龙、原始哺乳动物以及大量鱼类和两栖类化石(Chen *et al.*, 1998; 汪筱林等, 1998; Hou and Chen, 1999)。这些发现轰动了国际古生物学界,使热河生物群成为全世界古生物学界和新闻媒体关注的焦点。它对促进

生命发展历史中若干难题(如鸟类及其飞行的起源、早期哺乳动物的起源与演化等)的研究,具有十分重要的意义(陈丕基, 1999)。

近两年随着发掘工作的不断开展,在四合屯 11.9m 的剖面上,已发现十余个由大量脊椎动物组成的化石层,每层代表了一次非正常集群死亡事件(汪筱林等, 1999)。化石层与

* 国家自然科学基金(批准号:49972030)资助项目。

第一作者简介:郭正府,男,1963年10月生,博士后,副研究员,火山学及古气候变化专业。

火山凝灰岩(或火山灰)密切共存在一起。暗示了火山活动与脊椎动物集群死亡事件之间存在某种内在联系。另外,现代火山观测和理论研究表明,大规模火山活动喷出的火山气体、火山灰等可造成大范围的气候与环境突变,进而导致周围地区动植物的迅速死亡和掩埋(Brasseur and Granier, 1992)。

目前,对热河生物群的研究主要涉及生物群的时空分布、古生物学、地层学及古生态等方面(Chen *et al.*, 1998; 汪筱林等, 1998; Hou and Chen, 1999; 陈丕基, 1999), 这些研究无疑是非常有意义的。但对与脊椎动物化石层共存的凝灰岩(或火山灰)所代表的火山喷发喷出气体的研究鲜见报道。本区化石密度大, 保存完整, 与凝灰岩(或火山灰)关系密切, 是探讨火山喷发与生物集群死亡关系的理想地区, 这方面的工作可能成为进一步研究热河生物群的新的突破口。本文选择了四次规模较大的生物集群死亡事件及相应的火山凝灰岩(或火山灰)作为研究对象, 在测定了凝灰岩(或火山灰)斑晶矿物中岩浆包裹体和基质玻璃的挥发分气体组成的基础上, 探讨了火山喷出气体成分与脊椎动物化石组合之间的对应关系, 初步分析了本文研究的四次大规模生物集群死亡的原因。

1 地质简况及样品的层位

辽西及其周边地区位于中国东部大陆边缘北东向展布的西太平洋板块俯冲构造域与近东西向分布的欧亚构造域交叉复合的构造位置(陈义贤, 陈文寄等, 1997)。剧烈而频繁的火山活动是我国东部中生代构造运动的重要特征和表现形式。火山活动以其活动时间长、期次多、强度大、火山岩分布面积广和类型齐全而独具特色。

辽西四合屯含有大量脊椎动物化石的湖相沉积, 呈北北东向分布在长约 12~14km, 宽约 4~5 km 的范围内, 化石主要产出地点包括四合屯、尖山沟、张家沟、黄半吉沟、团山沟和李八郎沟等地。本区出露的地层为义县组下部(图 1), 总厚度约 110~150m, 共分为 3 段 9 层(汪筱林等, 1998)。第一段(1 层)为冲积相粗碎屑岩, 第二段(2-4 层)以中基性熔岩为主, 局部夹湖相砂页岩沉积, 第三段(5-9 层)由滨、浅湖→半深湖、深湖相砂岩、页岩和凝灰岩组成。其中第 6 层和第 8 层是脊椎动物化石的主要埋葬层位。本文研究标本的层位属于第三段的第 6 层, 所有样品均采自四合屯同一人工发掘剖面(图 1)。样品 YL001、YL002、YL003 和 YL004 分别属于汪筱林等(1998)划分的第 18 层的第 6 小层, 25 层的第 1 小层, 25 层的第 2 小层和 29 层的第 4 小层。样品 YL004 为四合屯发掘剖面 29(4)层富含孔子鸟化石的灰黑色页岩中间层内的火山灰, 它与化石层层位相同。样品 YL003 为发掘剖面 25(2)层富含恐龙化石的灰黑色页岩中的火山灰。样品 YL002 是

灰白色英安质沉凝灰岩, 夹于剖面 25(1)层富含小型兽脚类恐龙化石的灰黑色页岩中, 沉凝灰岩与化石层共存在一起。样品 YL001 为此剖面中富含 18(6)层脊椎动物化石的灰黑色页岩中的火山灰(图 1)。

2 样品的挑选及测试方法

显微镜下观察表明, 本区的凝灰岩和火山灰主要由斑晶(或晶屑)和基质玻璃组成, 主要斑晶矿物组合为石英+透长石+歪长石±斜长石±黑云母, 基质主要为玻屑和浆屑, 其形态各异, 呈鸡肋、犬齿状等。样品的挑选与处理程序如下, 先将样品粉碎, 在双目显微镜下挑出新鲜的斑晶(或晶屑)、玻屑和浆屑, 然后将它们用树胶镶嵌在载玻璃片上, 抛磨斑晶矿物直至暴露出岩浆包裹体, 利用电子探针测试岩浆包裹体和基质玻璃中 Cl、F 和 S 的含量, 选定工作电压 15kV, 电流 6~15nA, 束斑直径分别为 1~10 μ m(包裹体)和 15~20 μ m(基质玻璃)。水的含量通过“差异法”获得(Devine *et al.*, 1995)。该方法通过调节束斑直径(包裹体测量的束斑直径较小, 而基质玻璃测量的束斑直径相对较大)最大限度减小基质中微晶对测量结果的影响; 通过延长测定时间提高元素的测试精度和降低测量下限。本文采用的实验技术经国外许多实验室证实(如样品的平行测量、测定国际标样和不同的实验室验证等)(Devine *et al.*, 1995; Harm and Schmincke, 2000), 是一种高精度的测定挥发性组分的方法。各挥发性组分的相对分析误差为 5%~8%(S)、3%~5%(F)、 \leq 6%(Cl)和 $<$ 8%(H₂O)。为了保证斑晶矿物中岩浆包裹体的封闭体系, 本研究挑选具如下特点的岩浆包裹体(图 2)进行测试: (a)包裹体形状规则、无色透明, 边缘无裂隙, 在主晶矿物中分布无规律。无气泡(或体积 $<$ 10%), 无子矿物。(b)包裹体体积大小适中(直径为 25~70 μ m)。个体太大, 不易保持封闭性; 个体太小, 容易受“边界层效应”影响。

3 结果

3.1 火山喷出的气体成分及相对含量

具有上述特征的岩浆包裹体是主矿物结晶过程中捕获的周围熔浆经迅速冷凝的产物, 其挥发分组成代表了火山喷发前斑晶矿物结晶过程中其周围岩浆的挥发分成分; 与斑晶共存的基质玻璃中挥发分的成分代表了火山喷发后经过去气作用残存在岩浆中的挥发分组成(夏林圻, 1988)。两者之差为火山喷出的气体成分的相对含量。研究区岩浆包裹体和基质玻璃中挥发分组分的含量见表 1, 相应的火山喷出的气体成分的相对含量列于表 2。由表 2 可以看出, 本区火山喷出的气体含量总体上高于世界其它相同成分的火山喷出气体的含量。

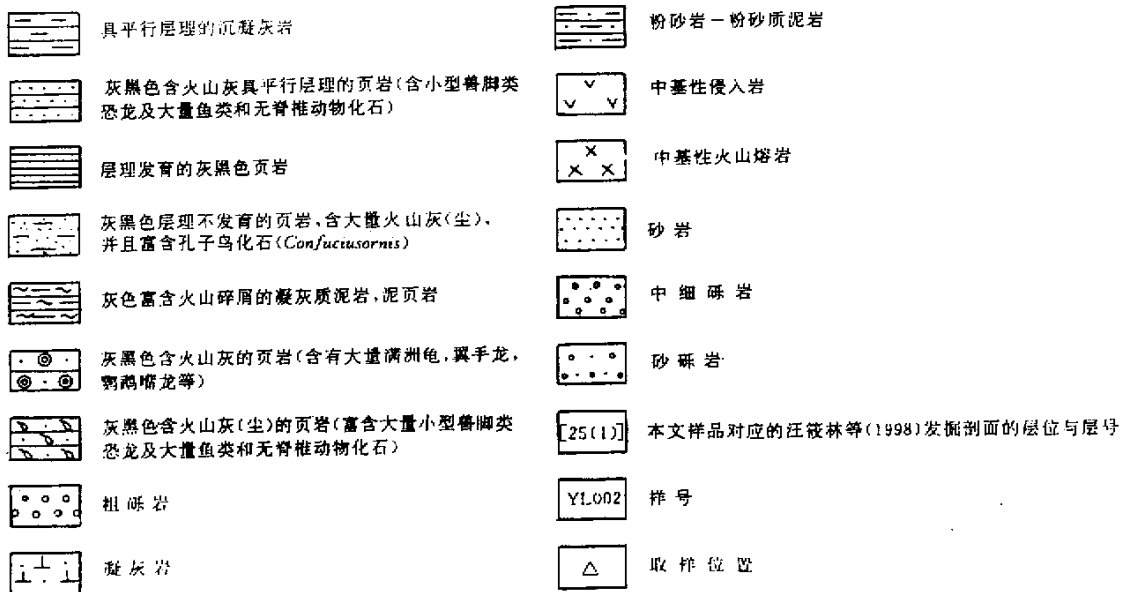
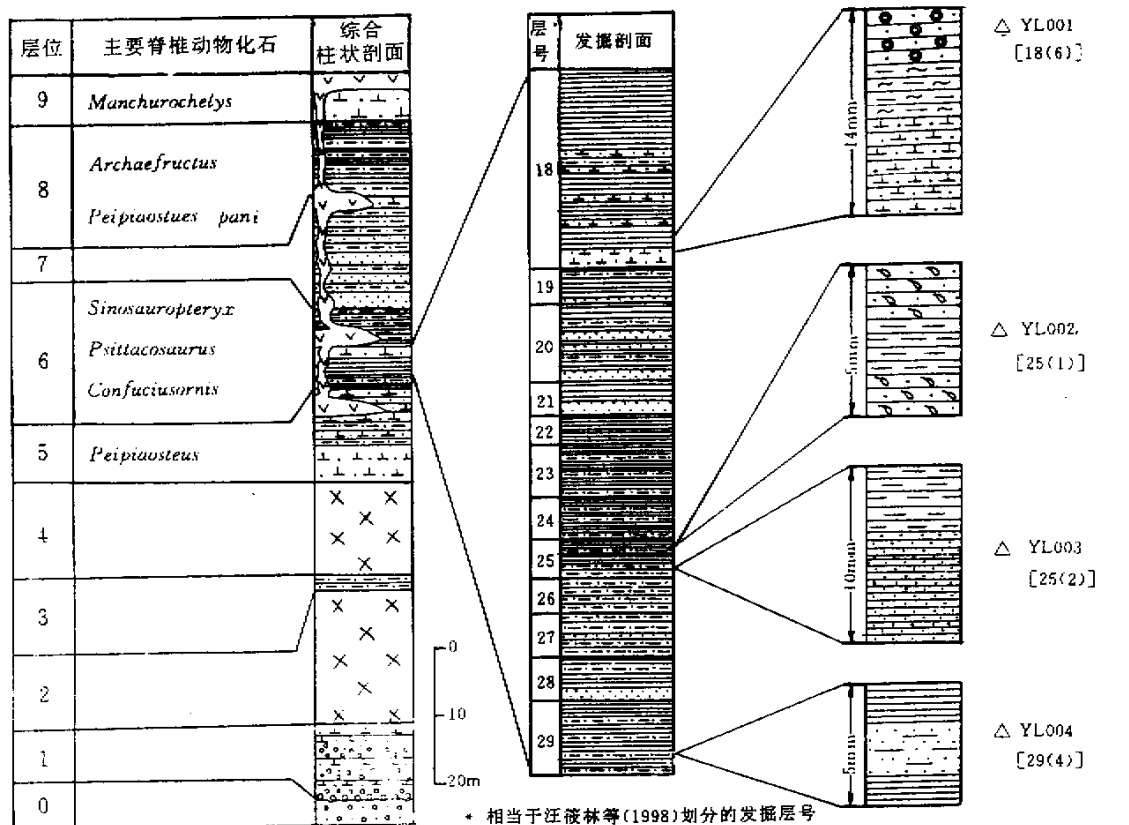


图 1 辽西四合屯及周边地区义县组下部综合柱状剖面与取样位置图

(据汪筱林等,1998,修改)

Fig.1 The composite columnar section of the lower part of the Yixian Formation in Sihetun and neighboring area, western Liaoning, NE-China (after Wang Xiaolin *et al.*, 1998, modified)

表 1 岩浆包裹体及玻璃基质中挥发性组分的含量(%)

Table 1 Volatile contents of glass inclusions and matrix glasses (%)

样号	剖面层位*	测试对象	斑晶矿物	S	F	Cl	H ₂ O	SiO ₂ **
YL001	18(6)	包裹体	歪长石	0.05	0.20	0.28	2.67	60.32
YL001	18(6)	包裹体	歪长石	0.05	0.23	0.40	3.01	61.21
YL001	18(6)	包裹体	歪长石	0.06	0.21	0.36	2.89	60.89
YL001	18(6)	包裹体	石英	0.06	0.21	0.38	2.94	61.25
YL001	18(6)	包裹体	石英	0.05	0.25	0.29	3.28	62.12
YL001	18(6)	基质		0.03	0.13	0.10	0.06	63.01
YL001	18(6)	基质		0.02	0.11	0.08	1.01	62.21
YL001	18(6)	基质		0.03	0.13	0.08	0.29	62.02
YL002	25(1)	包裹体	歪长石	0.08	0.16	0.15	2.40	57.32
YL002	25(1)	包裹体	歪长石	0.09	0.18	0.15	2.48	59.80
YL002	25(1)	包裹体	歪长石	0.08	0.14	0.17	2.46	58.64
YL002	25(1)	包裹体	石英	0.07	0.16	0.18	2.49	57.81
YL002	25(1)	包裹体	石英	0.07	0.17	0.15	2.58	57.43
YL002	25(1)	包裹体	石英	0.06	0.16	0.16	2.71	59.08
YL002	25(1)	基质		0.03	0.12	0.09	0.61	60.07
YL002	25(1)	基质		0.02	0.13	0.09	0.72	62.91
YL003	25(2)	包裹体	歪长石	0.10	0.15	0.16	2.67	59.33
YL003	25(2)	包裹体	歪长石	0.07	0.16	0.19	2.51	58.32
YL003	25(2)	包裹体	歪长石	0.09	0.16	0.18	2.82	60.21
YL003	25(2)	包裹体	石英	0.09	0.18	0.15	2.90	61.09
YL003	25(2)	包裹体	石英	0.08	0.18	0.17	2.40	60.33
YL003	25(2)	包裹体	石英	0.07	0.19	0.16	2.41	60.89
YL003	25(2)	基质		0.02	0.14	0.10	0.69	60.11
YL003	25(2)	基质		0.03	0.11	0.12	0.70	61.32
YL003	25(2)	基质		0.03	0.10	0.09	0.81	59.44
YL004	29(4)	包裹体	歪长石	0.03	0.18	0.17	5.18	65.21
YL004	29(4)	包裹体	歪长石	0.03	0.20	0.14	4.81	68.42
YL004	29(4)	包裹体	歪长石	0.03	0.18	0.09	4.66	66.31
YL004	29(4)	包裹体	歪长石	0.04	0.23	0.16	5.72	68.55
YL004	29(4)	包裹体	石英	0.02	0.24	0.11	5.62	68.18
YL004	29(4)	包裹体	石英	0.03	0.20	0.11	4.91	69.32
YL004	29(4)	基质		0.02	0.13	0.03	1.28	71.32
YL004	29(4)	基质		0.02	0.11	0.02	1.72	69.16
YL004	29(4)	基质		0.02	0.13	0.02	1.55	70.33

* 样品在四合屯发掘剖面中的层位。 ** 岩浆包裹体和基质玻璃中 SiO₂ 含量。

测试者: 郭正府。测试单位: 比利时 KUL 大学及德国 Bayreuth 大学。

测试仪器: Cameca SX50 型电子探针。

实验条件: 电压 15kV, 电流 6~15nA, 束斑直径分别为 1~10 μ m(岩浆包裹体)和 15~20 μ m(基质玻璃)。

测试误差: Cl 为 $\leq 6\%$; F 为 3%~5%; S 为 5%~8%; Si 为 $\leq 1\%$ 。

表 2 辽西火山喷出气体的含量(%,均值)及其与同类世界其它火山的对比

Table 2 Contents of volatile emissions in W-Liaoning and its comparison with those in other eruptions worldwide with the same compositions

样号或火山	S*	F	Cl	H ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O	SiO ₂ **
YL001	0.027(46%)	0.097	0.255	2.505	1.411	61.158
YL002	0.050(20%)	0.037	0.070	1.855	1.842	58.347
YL003	0.057(20%)	0.053	0.065	1.885	1.906	60.028
YL004	0.010(72%)	0.082	0.107	3.633	8.862	67.665
Agung	0.038		0.061	1.16		63.52
Campanian	0.002		0.041	0.03		60.42
Krakatau	0.004		0.015	3.09		68.92
St. Helens	0.004		0.006	4.91		69.90
Tambora	0.007		0.089	3.07		56.58

* ()内的数字为 H₂S 气体的百分比,根据岩浆包裹体中 Na₂O/K₂O 比值,按 Harms and Schmincke (2000)的模式计算。** 岩浆包裹体中 SiO₂ 含量(均值)。其它火山喷发气体的数据来源于 Devine *et al.* (1984)

表 3 火山喷出气体的相对百分比*

Table 3 Contents of volatile erupted

样号	S	F	Cl	H ₂ O
YL001	18.98	36.02	51.37	25.36
YL002	34.72	13.66	14.08	18.78
YL003	39.35	19.88	13.08	19.08
YL004	6.94	30.43	21.46	36.78

* 同种气体在四次喷发中的相对比例(均值)

3.2 火山喷发的气体成分与脊椎动物化石组合的关系

表 3 和图 3 表示本文研究的四次火山喷发喷出气体的组成特征。这四次喷发相比较而言,样品 YL001 代表的火山喷发喷出的气体组分以 Cl 和 F 为主,喷出的 Cl 的含量相当于 1815 年 Tambora 火山的 3 倍(1815 年 Tambora 火山喷发造成了 88000 人死亡,Stothers, 1984),其次为 S 和水蒸汽(表 2)。形成样品 YL002 和 YL003 的火山喷发其火山气体组成相似,均以 S 占优势,喷出的 S 含量比 1963 年的 Agung 火山还高(1963 年 Agung 火山喷发导致北半球地表温度降低了 1.3°C, Chester, 1993),其水蒸汽、F 和 Cl 含量居次要位置(表 2)。YL004 对应的火山喷发,喷出的气体以水蒸汽为主,卤族元素的含量相对也较高,但 S 的含量较低。另外,镜下观察表明,样品 YL004 的火山尘(dust)含量较高(20%左右)。上述特征说明,四次火山喷发喷出气体的相对组成差异较大。表 4 列出了四次火山喷发喷出的气体组成特征与研究区四次大规模脊椎动物集群死亡事件形成的化石组合层之间的对比关系。可以看出,火山喷出的各种气体成分(如 HCl、HF、SO₂、H₂S 和 SO₃ 等)的相对比例不同所对应的化石种类与组合也不同。如形成 YL004 火山灰的火山喷发气体以水蒸汽和火山尘为主,所对应的是大量孔子鸟化石;形成 YL002 沉凝灰岩和 YL003 火山灰的火山喷发的气体均以硫化物气体为主,对应的脊椎动物化石以众多小型兽脚类恐龙

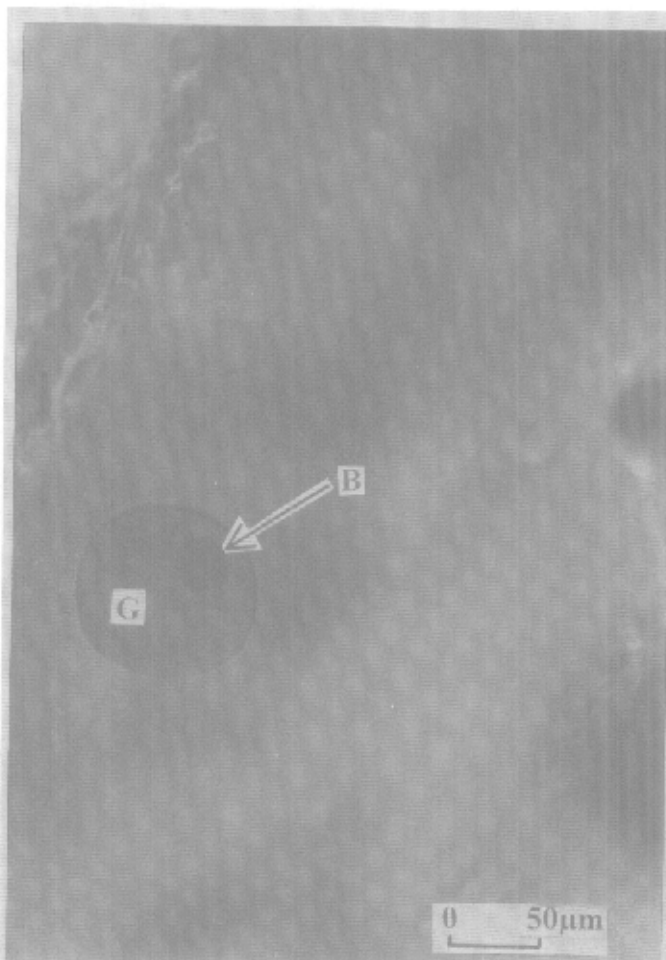


图 2 石英晶屑中的岩浆包裹体

(G 为岩浆包裹体; B 为气泡)

Fig. 2 The glass inclusion (G) with a bubble (B) in quartz phenocryst. Bar at lower right is 50 μ m

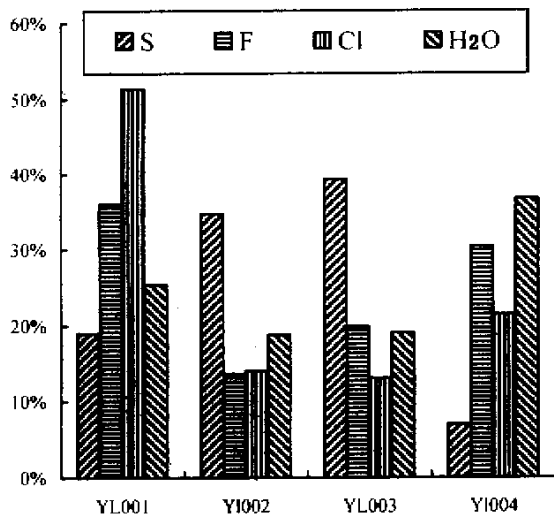


图3 四次火山喷发喷出气体成分相对比例的直方图解
Fig. 3 Histogram of volatile compositions for the four volcanic eruptions

表4 火山气体组合与脊椎动物化石组合的关系

Table 4 The relationship between volatile associations and vertebrate assemblages

样号	样品层位*	火山气体组合	脊椎动物化石组合及保存特征
YL001	18(6)层	HCl 和 HF 为主,硫化物气体和 H ₂ O 蒸汽次之。	满洲龟、翼手龙、鸚鵡嘴龙等。化石保存完整。
YL002	25(1)层	硫化物气体(H ₂ S、SO ₂ 和 SO ₃)占优势,	以小型兽脚类恐龙为主,含有大量的鱼类及无脊椎动物。
YL003	25(2)层	H ₂ O 蒸汽、HCl 和 HF 次要。	所有化石骨骼、羽毛、“羽毛”状结构和尾羽等保存完好。
YL004	29(4)层	H ₂ O 蒸汽为主,卤化物气体也较高,硫化物气体较少。另外含大量火山尘。	大量孔子鸟化石。化石具完整的骨骼和羽毛,前后肢及尾羽伸展,脖颈前伸,骨架长轴具定向排列。

* 指样品在四合屯发掘剖面中的层位。

** 通过比较样品与标准样的 SKL 波峰,可以获得火山气体中不同氧化态 S(S⁶⁺, S⁴⁺, S²⁻)的比例,在三种硫化物气体(H₂S、SO₂ 和 SO₃)中,SO₂ 和 SO₃ 的含量较高,H₂S 次之。

目前研究认为,火山喷出的 S、Cl 和 F 组分主要以 H₂S、SO₂、SO₃、HCl 和 HF 等气体形式存在 (Brasseur and Granier, 1992; Harm and Schmincke, 2000)。火山喷发主要通过两种方式造成生物集群死亡,一种是直接方式,即由于火山喷出的熔岩流、火山碎屑流和泥石流将周围的生物化为灰烬,这种方式的影响相对较小,并且生物难以保存下来;另一种是间接方式,即由于火山喷发把大量的火山气体、火山灰(尘)及其气溶胶喷至大气圈(甚至平流层),导致气候与

环境骤然变化,进而造成生物集群死亡,随后沉降的火山灰(尘)将死亡的生物迅速掩埋,这种方式的特点是生物集群死亡的范围广、数量多,化石保存完整(U. S. Geological Survey, 1997)。地史时期保存下来的与火山活动有关的化石(层)主要是通过这种方式。间接方式导致生物集群死亡主要表现在:

4 讨论

对现代活火山的观测表明,火山喷发可造成大量生物死亡。例如,位于巴布亚新几内亚的 Lamington 火山在 1951 年的喷发形成了规模巨大富含水蒸汽的火山灰云幕,炽热的火山灰云迅速扩散,毁灭了附近约 230km² 范围内的动植物,造成了约 6000 多人和大量动植物死亡 (Robert and Decker, 1980; 刘若新, 2000)。再如,1783 年冰岛 Laki 火山喷出的大量卤化物气体,弥漫在冰岛上空,污染了岛上及附近地区的草原植被,导致所有吃过当地青草的羊群死于氟中毒 (Robert and Decker, 1980); 1969~1974 年夏威夷 Kilauea 火山喷出的大量硫化物气体使 20 公里之外的硬花甘蓝等植物遭受到严重的损害,造成植物叶茎枯萎,甚至死亡 (U. S. Geological Survey, 1997)。类似的实例不胜枚举。

环境的骤然变化,进而造成生物集群死亡,随后沉降的火山灰(尘)将死亡的生物迅速掩埋,这种方式的特点是生物集群死亡的范围广、数量多,化石保存完整(U. S. Geological Survey, 1997)。地史时期保存下来的与火山活动有关的化石(层)主要是通过这种方式。间接方式导致生物集群死亡主要表现在:

(1)火山喷出的硫化物气体(H₂S、SO₂ 和 SO₃ 等)造成地表温度突变,使某些生物不适应新的气候环境而死亡。大量

的 SO_2 和 SO_3 气体随喷发柱进入大气圈(甚至平流层)后,在紫外线直接照射下,会发生一系列光化学反应(如 $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$, $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ 等),形成火山 H_2SO_4 气溶胶层,它们吸收太阳辐射,使到达地表的太阳总辐射量减小,导致地表温度骤然下降,产生“火山冬天”效应,从而对生物产生危害(Stothers, 1984; 郭正府等,1998)。观测发现,印度尼西亚的 Tambora 火山在 1815 年 4 月喷出的大量硫化物气体使北半球明显变冷,导致了 1816 年的“无夏之年”,造成附近 Sumbawa、Lombok 与美国东北部地区数千头牛羊和大面积植物死亡(Stothers, 1984; Chester, 1993)。

(2)火山喷发的有毒气体(H_2S 、 HCl 和 HF 等)、水蒸汽及火山尘,会产生浓密的火山灰云幕,造成周围动物窒息而死亡(Robert and Decker, 1980)。

(3)火山喷发破坏臭氧层,进而造成对生物的影响。某些火山喷发会导致大气圈中臭氧浓度降低、使大气圈臭氧层减薄,甚至形成“臭氧洞”,造成地表的动植物接受过量紫外线辐射,严重时可导致大范围内动植物死亡。火山喷发主要通过以下三种方式破坏大气臭氧层: a. 火山喷发形成的火山灰(尘)及气溶胶会促进平流层多相化学过程的发生,导致臭氧总量减少,臭氧层减薄(Brasseur and Granier, 1992); b. 在火山硫化物气体氧化形成硫酸气溶胶的过程中,会造成臭氧光解($\text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$)速率增加、生成速率相对减少,从而导致臭氧总量减少(Prather, 1992); c. 火山喷发的卤化物气体通过光化学反应,直接导致臭氧总量减少(Hofmann and Oltmans, 1992; 郭正府等,1998)。火山喷发的卤化物气体(如 HCl) 在强紫外线辐射下, HCl 会分解出 Cl 原子,发生如下光化学反应: $\text{HCl} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{Cl}$, $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$, $\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$, 造成大气圈 O_3 总量减少,使 O_3 层减薄,甚至破坏臭氧层,在局部地区形成“臭氧洞”,使地表的动植物接受过量紫外线辐射。目前人们普遍认为 1991 年菲律宾 Pinatubo 火山喷发至平流层的火山气体及气溶胶组合是造成 1992 年秋季南极上空臭氧洞面积骤然增加的主要原因(Brasseur and Granier, 1992)。

上述表明,火山喷发对气候的影响主要取决于火山气体的含量和成分。火山气体的含量越高,种类越多,对气候的影响越严重,反之亦然。表 2 显示,本区火山喷出的气体含量高于相同成分的其他火山喷出的气体含量,说明本区火山喷出的气体总量的比例较高,在喷发规模相同的情况下,它们对气候的影响较严重。

四合屯发掘剖面 29(4)层富含孔子鸟化石(图 1),是该区最富集的化石层,所发现的化石全部为 *Confuciusornis*,本区 90% 以上的鸟类化石来自这一层,该层已发现孔子鸟化石近千件,化石保存了完整的骨骼和羽毛,前后肢及尾羽伸展,脖颈前伸,骨架长轴具定向排列(汪筱林等,1999),表明为成群飞翔鸟类的非正常死亡事件。由表 4 可以看出,与此层对应的火山活动喷出的气体以水蒸汽和卤族气体(HCl 和

HF) 为主。镜下观察表明,此层中的火山尘(dust)含量较高(达 20% 左右)。作者认为,四合屯发掘剖面 29(4)层孔子鸟的集群死亡可能是由于火山喷出的大量水蒸汽、卤族气体和火山尘导致鸟类窒息而致。另外,野外观察,富含鸟化石的灰黑色页岩层属半深湖—深湖相,缺失边缘相。该层发现的孔子鸟化石均为成年个体,未发现幼年个体。推断火山活动开始时,喷出的一些有毒气体(如 HF 、 HCl 、 H_2S 、 SO_2 和 SO_3) 会不同程度地溶于湖水中,形成新的大气-湖面化学平衡,使深湖-半深湖上空火山有毒气体浓度相对较低,飞翔能力强的成年个体选择了深湖-半深湖上空作为临时“避难所”。然而,随着火山活动强度逐渐增大,火山喷出的卤族等有毒气体、水蒸汽及火山灰(尘)的量越来越大,形成高浓度富水的火山灰云幕,它对深湖-半深湖上空鸟类羽毛具有强烈的粘附作用(U. S. Geological Survey, 1997),导致鸟类最终不堪“负重”飞行和缺氧而死亡,沉入湖底。半深湖-深湖静水还原环境及频繁火山活动提供的大量火山物质,使尸体快速埋葬,并保存了上面所描述的飞行状态(肢体伸展、脖颈前伸等)。由于大量有毒气体随着火山喷发喷向空中,当它们因比重较大向地面沉降时,会与火山喷出的大量水蒸汽结合(表 3),形成酸雨。因此,相比较而言,地表火山气体的浓度比鸟类飞行的空中要小得多。另外,此次火山喷发的挥发分以卤族气体为主,硫化物气体总量相对较小(表 3, 图 3),因此,对地表温度影响也较小。所有这些因素造成此次火山喷发对地表爬行动物影响较少,这可能是在发掘剖面 29(4)层中没有或很少发现爬行动物化石的一个原因。

从发掘剖面 25(1)和 25(2)层可看出两次小型兽脚类恐龙集群死亡事件(图 1)。25(2)层化石以 *Protarchaeopteryx-Caudipteryx* 为代表,位于灰黑色页岩中,化石层上覆厚度 5 mm 的英安质凝灰岩。镜下观察及电子探针测试显示,25(2)层富含恐龙化石的灰黑色页岩中含有火山灰,其化学成分与上覆凝灰岩相同,可能为同一次火山喷发的产物。25(1)层以 *Sinosauropteryx-Dromaeosauridae* 化石为代表,产出于厚度约 5mm 的黑色页岩之中,其间夹厚度约 1mm 灰白色英安质层凝灰岩。这两个化石层的共同特点是,以小型兽脚类恐龙为主,含有大量的鱼类及无脊椎动物,所有化石骨骼、羽毛、“羽毛”状结构和尾羽等保存完好,有的恐龙胃部还保留有胃石,中华龙鸟胃腔中保留未消化的食物(汪筱林等,1999),真实地记录了化石快速埋葬的过程,是非正常死亡的直接反映。形成 YL002 凝灰岩和 YL003 火山灰的两次喷发喷出气体的相对比例以 SO_2 和 SO_3 为主,达到火山气体中 S 总量的 80%(表 2 和 3)。作者认为,火山活动喷出的大量硫化物气体及其硫酸气溶胶,它们会造成地表温度突变和对大气臭氧层的破坏,使大批冷血类型恐龙不能适应气温变化和过量紫外线辐射而死亡。有些恐龙个体,如“长毛”的温血类型恐龙适应这种环境而生存下来,但当火山活动规模很大,其对气候的影响超过某一临界值时,会导致各类恐龙突然死亡。而

后,滞留在大气圈中的大量火山灰(尘)会由于重力而沉降下来,迅速覆盖动物的尸体,使其不被氧化,对化石层的完整保存有贡献作用。

发掘剖面 18(6)层记录了另一次大规模的脊椎动物集群死亡事件(图 1),化石包括 *Manchurochelys sp.*, *Pterodactyloidea, gen. et sp. nov.*, *Psittacosaurus sp.* 等(汪筱林等, 1998),它们产于灰黑色页岩中,该层之上迄今没有再发现脊椎动物化石层。显微镜观察显示,富含化石的灰黑色页岩中含有火山灰。斑晶矿物及其包裹体的电子探针测试结果表明,火山灰的化学成分与其上下两层凝灰岩相同,它们可能为同一期火山喷发的产物。该火山喷出的气体成分以 Cl 和 F 为主,其喷出的相对比例位于四次火山喷发之首,另外,其水蒸汽的含量也较高(表 3 和 4)。我们认为,这次火山喷发喷出的大量 HCl 和 HF 气体会破坏大气臭氧层,严重影响生态环境;其次,硫化物气体与水蒸汽会形成浓厚的硫酸气溶胶层,导致地表温度骤然下降。最终造成本区 18(6)层脊椎动物集群死亡。

与火山灰(尘)相比而言,火山气体由于在大气圈中滞留的时间较长,扩散范围较大,通过光化学反应造成对气候与环境的影响。因此它们对气候与环境影响的时空范围较大,且影响程度较严重(Devine *et al.*, 1984)。与发掘剖面 18(6)化石层(图 1)对应的火山喷发喷出的气体含量相对较高,且成分以对臭氧层有重要影响的 HCl 和 HF 为主(表 2 和 3),而火山灰含量较低,因此此次火山喷发对气候的影响较深远。作者认为这可能是造成 18(6)化石层之上没有再发现脊椎动物化石层的原因。

5 结论

火山活动与辽西四合屯脊椎动物集群死亡事件的化石记录之间在空间和时间上存在密切的对应关系。不同的脊椎动物化石组合层内火山灰斑晶中包裹体和玻璃基质的气体含量的相对比例存在着差异。火山活动主要通过间接方式导致本区生物集群死亡。火山喷出的火山灰和不同成分气体(HCl, HF, H₂S, SO₂, H₂O 等)的气候、环境综合效应是造成这些生物非正常死亡的重要原因。

需要指出的是,本文只是选择了四次规模较大的生物集群死亡事件及相应的火山凝灰岩层(或火山灰)进行了研究。在四合屯富含脊椎动物化石层位的 11.9m 的发掘剖面上已分辨出百余层火山灰;另外,研究表明(陈义贤和陈文寄, 1997),辽西及邻区发育大面积的同时代火山岩,此时辽西及邻区火山活动十分强烈,并且具多期次、多旋回的喷发特征。从四合屯凝灰岩中火山碎屑的粒度及化学特征判断,这里距火山喷发地不会很远。那么,如此频繁、强烈的火山活动和这些脊椎动物集群的发生、辐射、绝灭、复苏的演化过程之间是否存在因果关系?值得进一步研究。

致谢 样品的测试工作得到比利时 KUL 大学 J. Hertogen 教授、J. Mareels 和 M. Romain 博士的帮助,在此一并表示感谢。

References

- Brasseur G, Granier C. 1992. Mount Pinatubo aerosols, chlorofluorocarbons and ozone depletion. *Science*, 257: 1239—1242
- Chen P J, Dong Z M, Shen S N. 1998. An exceptionally well-preserved theropod dinosaur from the Yixian Formation of China. *Nature*, 391: 147—152
- Chen P-J. 1999. Distribution and spread of the Jehol Biota. In: Chen P-J and Jin F (eds.), *Jehol Biota*. Hefei: Press of University of Science and Technology of China: 1—6 (in Chinese with English abstract)
- Chen Y X, Chen W J, *et al.* 1997. Volcanic rocks in west Liaoning and its adjacent areas. Beijing: Seismological Press, 201—217 (in Chinese with English abstract)
- Chester D. 1993. *Volcanoes and Society*. London: Edward Arnold Press, 163—168
- Devine J D, Gardner J E, Brack H P, Layne G D, Rutherford M J. 1995. Comparison of microanalytical methods for estimating H₂O contents of silicic volcanic glasses. *Am Mineral*, 80: 319—328
- Devine J D, Sigurdsson H, Davis A N. 1984. Estimates of sulfur and chlorine yield to the atmosphere from volcanic eruptions and potential climatic effects. *J Geophys Res*, 89: 6309—6325
- Guo Z F, Liu J Q. 1998. Effect of Mesozoic volcanic eruptions on Paleoclimate, Zhanjiakou basin, Hebei province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 14 (3): 318—331 (in Chinese with English abstract)
- Harm E, Schmincke H-U. 2000. Volatile Composition of the phonolitic Laacher See magma (12900 yr BP): implications for syn-eruptive degassing of S, F, Cl and H₂O. *Contrib Mineral Petrol*, 138: 84—98
- Hofmann D J, Oltmans S J. 1992. Observation and possible causes of new ozone depletion in Antarctica in 1991. *Nature*, 359: 283—287
- Hou L H, Chen P J. 1999. *Liaoxiornis delicatus gen. et sp. nov.*, the smallest Mesozoic bird. *Chinese Science Bulletin*, 44 (9): 834—838
- Liu R X. 2000. *Active Volcanoes in China*. Beijing: Seismological Press, 101—102 (in Chinese)
- Prather M. 1992. Catastrophic loss of stratospheric ozone in dense volcanic clouds. *J Geophys Res*, 97 (D9): 10187—10191
- Robert and Decker. 1980. *Volcano Watching*. Hawaii: Hawaii Natural History Press, 28—33
- Stothers R. 1984. The great Tambora eruption in 1815 and its after-

- math. Science, 224: 1191—1198
- U. S. Geological Survey. 1997. Volcanic and Seismic on the Island of Hawaii. U. S. Government Printing Office Press, 12—16
- Wang X L, Wang Y Q, Wang Y, Xu X, Tang Z L, Zhang F C, Hu Y M, Gu G, Hao Z L. 1998. Stratigraphic sequence and vertebrate-bearing beds of the lower part of the Yixian formation in Sihetun and neighboring area, western Liaoning, China. *Vertebrata Palasiatica*, 36 (2):81—101 (in Chinese with English abstract)
- Wang X L, Wang Y Q, Xu X, Wang Y, Zhang J Y, Zhang F C, Jin F, Gu G. 1999. Record of the Sihetun vertebrate mass mortality events, western Liaoning, China; caused by volcanic eruptions. *Geological Review*, 45 (sup.): 458—467 (in Chinese with English abstract)
- Xia L Q. 1988. On study of chemical compositions of magmatic inclusions. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7(1):1—10 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 陈丕基. 1999. 热河生物群的分布与发展. 见: 陈丕基, 金帆主编. 热河生物群. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1—6
- 陈义贤, 陈文寄等. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩. 北京: 地震出版社, 201—217
- 郭正府, 刘嘉麒. 1998. 张家口中生代火山盆地火山喷发对古气候的影响. *岩石学报*, 14 (3):318—331
- 刘若新. 2000. 中国的活火山. 北京: 地震出版社, 101—102
- 汪筱林, 王元青, 王原, 徐星, 唐治路, 张福成, 胡耀明, 顾罡, 郝兆林. 1998. 辽西四合屯及周边地区义县组下部地层层序与脊椎动物化石层位. *古脊椎动物学报*, 36 (2):81—101
- 汪筱林, 王元青, 徐星, 王原, 张江永, 张福成, 金帆, 顾罡. 1999. 辽西四合屯脊椎动物集群死亡事件: 火山爆发的灾变记录. *地质论评*, 45 (增刊):458—467
- 夏林圻. 1988. 岩浆包裹体化学成分研究. *岩石矿物学杂志*, 7 (1):1