

辽西中生代火山喷发对古气候和古脊椎动物生存环境的影响*

郭正府** 刘嘉麒

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

汪筱林

(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044)

摘要 在对辽西四合屯发掘剖面的中酸性火山凝灰岩和凝灰质沉积岩系统取样的基础上, 通过测定火山喷发物中斑晶内岩浆包裹体和基质玻璃的主要元素成分和挥发分组成, 获得与喷发物对应的火山活动向当时大气圈输送的火山气体成分及其含量。依据火山喷出气体的组成特征, 将本区中生代火山喷出气体划分为三个组合: 以 $F > Cl$ 的卤化物为主的气体组合、以 $Cl > F$ 的卤化物为主的气体组合和以硫化物为主的气体组合; 并具体分析了它们对古气候演变和古脊椎动物生存环境造成的影响。结果表明, 辽西中生代火山喷发能够对当时古气候和古环境造成足以引起脊椎动物集群死亡级别的灾难性影响, 同期大规模的火山喷发或者多次频繁的中等规模的火山喷发造成研究区脊椎动物集群死亡。

关键词 火山喷发 古气候 脊椎动物集群死亡 臭氧层 酸雨 辽西

火山喷出气体和气溶胶的组成与含量决定着火山活动对气候、环境影响的方式和程度^[1]。不同成分的火山气体及其组合会使得气候和环境的变化趋势不同, 火山喷出气体和气溶胶的总量制约着气候和环境变化的幅度^[1]。火山喷发柱最大高度限定了火山活动对气候和环境影响的时空范围^[2,3]。因此, 评价火山喷发对气候与环境是否造成严重影响的前提是在利用火山喷发动力学模式获得喷发柱最大高度的基础上, 定量测定火山喷出气体及其气溶胶的成分与含量。

辽西北票四合屯出露有保存完好的中生代火山-湖相沉积剖面, 剖面中含有多层高密度脊椎动物化石构成的化石层, 著名的热河生物群就赋存在这套火山-沉积地层中。研究表明, 这些化石层是中生代脊椎动物非正常集群死亡的记录^[4-6]。野外观察和显微岩相学研究^[7]显示, 湖相沉积物中含有多层中酸性火山凝灰岩和沉凝灰岩夹层, 并且这些火山空降沉积物与脊椎动物化石层密切共生, 彼此呈互层出现; 化石层往往被中酸性火山凝灰岩或凝灰质页岩(或粉砂岩)覆盖, 而化石层本身也赋存在火山凝灰岩、沉凝灰岩或凝灰质页岩(或泥岩、粉砂岩)之中。这些野外观察和室内显微镜研究结果均表明, 火山活动与辽西脊椎动物化石层所代表的集群

2002-02-21 收稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49972030)

** E-mail: zhengfuguo@263.net

死亡事件之间存在着内在联系^[5,7]。但是,辽西地区上述湖相沉积物中火山空降物质所代表的火山喷发对当时的古气候、古环境是否造成过能够引起脊椎动物集群死亡级的灾难性影响?如果造成过这种影响,其机理和具体表现是什么?有关这些方面的工作目前尚未见具体的研究报道,本文通过对发掘剖面的系统研究、取样,测定了剖面中火山空降物所代表的火山喷发喷出的气体和气溶胶的成分与含量,在此基础上,讨论了热河生物群生存时期火山活动对当时辽西地区古气候和脊椎动物生存环境造成的影响。

1 地质简况

辽西地区位于我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背景下^[8],剧烈而频繁的中生代火山活动是本区的重要特征。研究区中生代火山岩分布面积广,从成分上构成基性-中性-中酸性-酸性演化谱系。火山喷发以其爆发强度大、期次多和喷发频率高为特征。

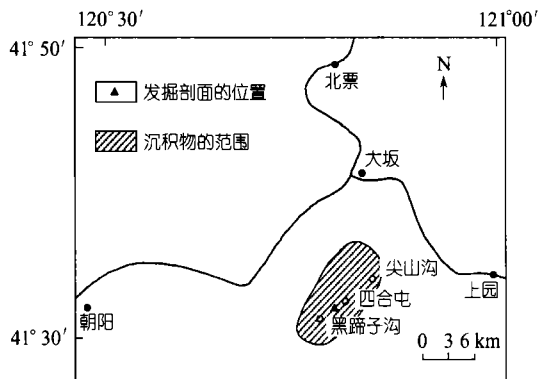


图 1 四合屯发掘剖面的地理位置图

1997~1998 年该发掘剖面的下部,相当于文献[4,6]中的 18(6)至 37(3)层,本文采集的顶部至底部样品的厚度为 7 m^[6]。

2 样品与方法

在对整个剖面和区域上火山岩分布特征系统研究和全面调查的基础上,从发掘剖面顶部至底部系统取样,平均约每 5 cm 1 个样品,在脊椎动物化石层和火山灰层密度较大的层位附近加密取样,保证对每层肉眼能区分的火山灰都进行取样。本文挑选测试样品的原则为,在保证 18~37 层^[4,6]之间的每个层位至少有一个样品用于测试的前提下,对于含有脊椎动物化石层的层位选取化石层内的新鲜火山碎屑;对于化石较富集但不能构成化石层的层位选取与化石位于同一层面新鲜的火山碎屑;而对于脊椎动物化石较少的层位选取化石附近厚度相对较大并且新鲜的火山碎屑。先将样品粉碎,在双目显微镜下挑选出新鲜斑晶(或晶屑)、玻屑和浆屑,然后清洗并将它们用树脂镶嵌在载玻璃片上,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,测试过程中选定工作电压 15 kV, 电流 6~15 nA, 束斑直径分别为 1~10 μm(包裹体)和 15~20 μm(基质玻璃)。水的含量通过“差异法”获得^[10]。该方法通过调节束斑直径(测量包裹体的束斑直径较小,而测量基质玻璃的束斑直径

本文重点研究以辽西四合屯为中心、夹于含有大量脊椎动物化石的湖相沉积层中的中酸性火山喷发物,湖相沉积物野外露头呈北北东向展布,主要分布在长 12~14 km, 宽 4~5 km 的范围内(图 1)。典型的出露地点包括四合屯及其附近的尖山沟、黑蹄子沟、张家沟、黄半吉沟、团山沟和李八郎沟^[4]等。火山喷发物所赋存的湖相地层属于中生代义县组下部,最近获得的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄为 124.6 Ma^[9]。由于四合屯人工发掘剖面的上部不含脊椎动物化石^[4],因此本研究所分析的样品均来自

相对较大)最大限度地减小基质中微晶对测试结果的影响; 通过延长测定时间提高元素的测试精度和测量下限. 本文采用的实验技术和方法经国外实验室证实(如样品的平行测量、测定国际标样和不同的实验室验证等)^[3,10], 是一种高精度的定量测定挥发性气体组分的方法. 各元素的相对分析误差分别为 <5%(S), <3%(F), <4%(Cl)和 <5%(H₂O). 为了保证斑晶矿物中岩浆包裹体的封闭体系和最终测定的火山气体含量有较高的精确度, 本方法对用于测试的岩浆包裹体及其主晶矿物都有严格要求, 具体标准见文献[3,11].

3 结果

显微镜观察表明, 本区火山碎屑岩中晚期结晶的斑晶(或晶屑)以透长石和石英为主, 这些斑晶中原生岩浆包裹体和基质玻璃的化学组成可以近似代表火山喷出的熔浆成分. 将透长石和石英中的岩浆包裹体以及基质玻璃的成分(表 1)在硅-碱图(图 2)上投点. 结果表明, 本区火山岩结晶晚期的斑晶中岩浆包裹体和基质玻璃的成分差别不明显. 火山岩由粗面安山岩、粗面岩、粗面英安岩和流纹岩组合构成, 以粗面岩和粗面英安岩为主. 岩石位于碱性与亚碱性系列的分界线附近(图 2).

研究表明, 晚期斑晶原生岩浆包裹体中的挥发分含量与共存基质玻璃中挥发分的含量之差代表火山喷发进入大气圈的气体组分的含量^[11]. 研究区岩浆包裹体和基质玻璃中挥发分组分(S, F, Cl, H₂O)的含量见表 1, 相应的火山喷出气体的含量列于表 2. 由表 2 和图 3 可以看出, 位于脊椎动物化石层内的火山碎屑与不含脊椎动物化石层的层位内火山碎屑, 其火山喷出气体含量差别较大. 并且, 本区位于脊椎动物化石层内的火山碎屑所代表的喷发喷出的气体(H₂O 蒸汽除外)含量高于世界其他地区相同(或相近)成分的火山活动喷出气体的含量(表 2).

4 讨论

发掘剖面自下至上火山喷发物所代表的喷发喷出的气体含量相差较大(图 3 和表 2). 总体上, 火山喷出气体含量呈现两个变化旋回: 由底部 37 层向上演化至 25 层为第一旋回; 其上部的 24 层至 18 层为第二旋回(图 3). 每个旋回从下到上喷出的各种火山气体含量总体上呈增加趋势, 即旋回上部喷发物代表的火山喷发喷出的气体含量比下部显著地高. 第一旋回内的火山喷发物赋存的地层厚度较大, 约为 456 cm; 而第二旋回厚度较小, 约为 244 cm. 以往研究表明, 本区与火山喷发物互层的湖泊沉积物属于玛珥湖沉积物, 自下而上其沉积速率较稳定^[15]. 因此, 相对应的厚度较大的第一旋回持续时间较长, 第二旋回持续时间相对较短. 并且, 第一

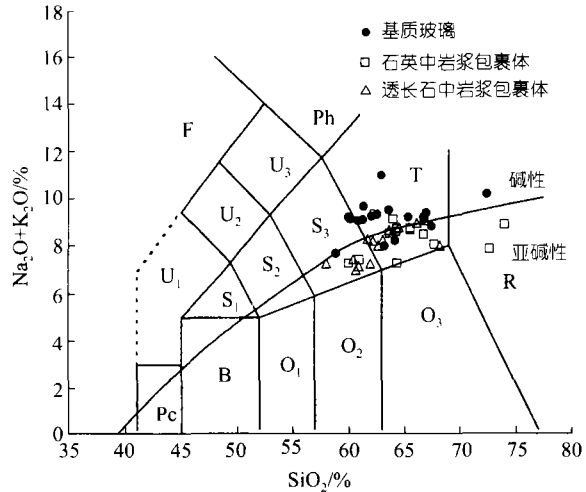


图 2 火山岩分类图解

图中的曲线为碱性和亚碱性系列的分界线(据文献[12]). 火山岩符号据文献[13]: R, 流纹岩; O₃, 英安岩; O₂, 安山岩; O₁, 玄武安山岩; B, 玄武岩; Pc, 苦橄玄武岩; T, 粗面岩(Q < 20%)和粗面英安岩(Q > 20%); S₃, 粗面安山岩; S₂, 玄武质粗面安山岩; S₁, 粗面玄武岩; Ph, 响岩; U₃, 碱玄质响岩; U₂, 响岩质碱玄岩; U₁, 碱玄岩(OI < 10%)和碧玄岩(OI > 10%); F, 副长石岩

表 1 火山喷发物斑晶中原生岩浆包裹体和基质玻璃的电子探针分析结果(%)^{a)}

样号	样品层位	主晶/基质	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	F	Cl	H ₂ O	总量
18(L)	18(6)	石英	61.88	0.68	14.85	4.32	0.11	2.14	3.64	4.41	3.83	0.38	0.052	0.224	0.387	3.097	96.903
18(L)	18(6)	石英	62.57	0.63	14.66	3.68	0.12	1.97	3.08	4.31	4.02	0.37	0.051	0.236	0.403	3.900	96.100
18(L)	18(6)	石英	62.72	0.65	14.73	3.79	0.11	1.93	3.06	4.22	4.05	0.37	0.051	0.245	0.416	3.658	96.342
18(L)	18(6)	透长石	61.83	0.71	15.08	4.41	0.09	2.17	3.69	4.39	3.85	0.41	0.055	0.227	0.365	2.723	97.277
18	18	基质	62.09	0.68	15.59	3.63	0.13	2.14	3.16	6.52	4.28	0.36	0.032	0.136	0.078	1.174	98.826
19	19	透长石	55.38	0.81	17.49	5.27	0.08	3.88	4.83	3.76	3.14	0.76	0.069	0.134	0.158	4.239	95.761
19	19	基质	56.94	0.78	16.96	5.16	0.07	3.81	4.75	3.88	3.54	0.82	0.044	0.124	0.125	2.997	97.003
20(U)	20(2)	透长石	60.11	0.81	15.32	4.82	0.18	1.91	4.57	4.15	3.54	0.54	0.071	0.172	0.156	3.651	96.349
20(M)	20(5)	石英	61.09	0.91	15.07	4.75	0.14	1.84	3.51	4.28	3.87	0.38	0.064	0.156	0.145	3.795	96.205
20(L)	20(10)	透长石	59.61	0.82	15.68	4.59	0.14	2.07	4.51	4.06	3.79	0.58	0.053	0.166	0.138	3.793	96.207
20	20	基质	61.32	0.95	15.49	4.82	0.11	1.92	3.83	4.91	4.18	0.46	0.045	0.149	0.125	1.691	98.309
21(U)	21(1)	石英	60.18	0.79	15.08	4.27	0.12	1.98	4.69	4.59	4.36	0.48	0.054	0.129	0.144	3.133	96.867
21(U)	21(1)	基质	60.59	0.85	15.71	4.59	0.07	2.16	4.81	4.85	4.64	0.37	0.034	0.124	0.112	1.090	98.910
22	22	透长石	58.69	0.89	15.29	4.98	0.21	1.96	4.67	4.59	3.28	0.59	0.074	0.165	0.161	4.450	95.550
22	22	基质	59.33	0.76	15.99	4.88	0.18	1.64	4.51	4.42	4.34	0.72	0.053	0.135	0.139	2.903	97.097
23(L)	23(8)	透长石	61.08	0.89	15.13	4.77	0.11	1.76	3.64	4.46	3.82	0.35	0.049	0.128	0.117	3.696	96.304
23(L)	23(8)	基质	62.17	0.91	15.08	4.58	0.08	1.67	3.59	4.77	4.47	0.37	0.039	0.113	0.111	2.047	97.953
24(U)	24(1)	石英	64.08	0.53	14.02	3.49	0.09	1.84	2.91	4.46	4.17	0.28	0.083	0.172	0.186	3.689	96.311
24(L)	24(3)	石英	63.84	0.58	14.26	3.51	0.12	1.89	2.94	4.26	3.84	0.38	0.051	0.124	0.131	4.074	95.926
24	24	基质	64.83	0.55	14.16	3.44	0.11	1.85	2.88	4.65	4.26	0.34	0.036	0.111	0.102	2.681	97.319
25(U)	25(1)	石英	58.43	0.76	16.34	6.05	0.14	3.87	4.01	3.62	3.45	0.67	0.091	0.178	0.164	2.227	97.773
25(U)	25(1)	基质	59.31	0.65	16.46	5.11	0.13	3.67	3.97	4.58	4.47	0.51	0.024	0.132	0.086	0.898	99.102
25(L)	25(2)	透长石	58.97	0.82	16.29	4.98	0.16	3.57	4.89	3.32	3.46	0.74	0.088	0.246	0.177	2.289	97.711
25(L)	25(2)	基质	61.49	0.56	15.24	4.69	0.11	3.26	4.06	5.13	3.98	0.48	0.024	0.123	0.114	0.739	99.261
26	26	石英	64.56	0.55	14.07	3.37	0.11	1.77	2.87	4.01	3.67	0.39	0.076	0.237	0.176	4.141	95.859
26	26	基质	65.28	0.51	13.59	3.61	0.09	1.85	2.88	4.71	4.42	0.43	0.024	0.111	0.114	2.381	97.619
27	27	透长石	63.02	0.56	14.38	3.56	0.13	1.87	2.87	4.59	3.92	0.41	0.052	0.131	0.127	4.380	95.620
27	27	基质	63.89	0.59	15.08	3.67	0.18	1.96	2.77	4.69	4.28	0.56	0.037	0.101	0.097	2.095	97.905

续表 1

样号	样品层位	主晶/基质	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	F	Cl	H ₂ O	总量
28(U)	28(1/2)	石英	59.29	0.76	16.28	4.78	0.13	3.53	4.55	3.51	3.67	0.68	0.079	0.251	0.162	2.328	97.672
28(L)	28(3/4)	透长石	58.67	0.77	16.21	5.89	0.13	3.76	4.12	3.67	3.56	0.37	0.091	0.261	0.157	2.341	97.659
28	28	基质	60.18	0.56	16.17	5.06	0.11	3.66	3.78	4.51	4.39	0.35	0.031	0.132	0.085	0.982	99.018
29(M)	29(3)	透长石	58.32	0.66	15.64	5.91	0.17	3.72	3.92	3.48	3.34	0.57	0.084	0.173	0.159	3.854	96.146
29(M)	29(3)	基质	59.02	0.61	16.37	5.13	0.11	3.58	3.75	4.52	4.38	0.53	0.026	0.137	0.084	1.753	98.247
29(U)	29(2)	石英	68.19	0.44	13.69	1.12	0.05	1.02	1.42	3.48	3.89	0.52	0.037	0.249	0.137	5.757	94.243
29(L)	29(4)	石英	69.54	0.25	12.31	1.23	0.04	0.73	1.21	3.61	4.71	0.23	0.034	0.258	0.152	5.696	94.304
29(U/L)	29(2/4)	基质	70.44	0.16	14.42	0.78	0.08	0.08	1.02	4.12	5.76	0.33	0.030	0.112	0.040	2.628	97.372
30(U)	30(1)	透长石	64.89	0.57	14.06	3.05	0.13	1.69	2.62	3.58	4.05	0.54	0.068	0.206	0.138	4.408	95.592
30(U)	30(1)	基质	65.33	0.48	13.59	3.17	1.11	1.86	2.39	4.09	4.41	0.33	0.024	0.124	0.109	2.983	97.017
31(L)	31(3)	石英	60.84	0.75	15.09	4.31	0.09	1.83	4.35	3.11	3.75	0.36	0.053	0.159	0.142	5.166	94.834
31(L)	31(3)	基质	61.37	0.77	15.23	4.21	0.06	1.62	4.17	3.15	4.68	0.33	0.029	0.125	0.111	4.145	95.855
32	32	透长石	61.02	0.77	15.01	4.38	0.08	1.58	3.02	4.27	4.02	0.44	0.051	0.119	0.122	5.118	94.882
33(U)	33(1)	透长石	59.59	0.83	15.43	4.76	0.13	1.97	3.51	4.19	3.57	0.52	0.046	0.145	0.159	5.150	94.850
34(U)	34(2)	石英	60.89	0.78	15.06	4.42	0.09	1.59	3.09	4.23	3.99	0.48	0.065	0.132	0.137	5.046	94.954
35	35	透长石	59.47	0.82	15.08	4.81	0.14	1.96	3.77	4.12	3.65	0.49	0.044	0.148	0.146	5.352	94.648
36	36	石英	61.07	0.78	14.96	4.29	0.12	1.62	3.15	4.38	4.29	0.67	0.041	0.127	0.137	4.365	95.635
37(L)	37(3)	透长石	58.87	0.72	15.28	5.11	0.12	3.61	3.81	3.43	3.47	0.64	0.062	0.138	0.146	4.594	95.406
32-37	32-37	基质	60.82	0.51	15.11	4.29	0.1	3.56	3.67	3.43	4.22	0.48	0.024	0.103	0.110	3.573	96.427

a) 样号栏中数字表示层号, 括号内的字母 L, M 和 U 分别表示下、中和上部; 样品层位栏与文献[4,6]中发掘剖面的层位相当。仪器型号: Cameca SX50; 测试单位: 德国 Kiel 大学和比利时 KU Leuven 大学; 测试者: 郭正府

表 2 辽西火山喷出气体含量及其与相同(或相近)成分世界其他火山的对比(%^{a)})

样号	主晶矿物	S	F	Cl	H ₂ O
18(L)	石英	0.020	0.088	0.309	1.923
18(L)	石英	0.019	0.100	0.325	2.726
18(L)	石英	0.019	0.109	0.338	2.484
18(L)	透长石	0.023	0.091	0.287	1.549
19	透长石	0.025	0.010	0.033	1.242
20(U)	透长石	0.026	0.023	0.031	1.960
20(M)	石英	0.019	0.007	0.020	2.104
20(L)	透长石	0.008	0.017	0.013	2.102
21(U)	石英	0.020	0.005	0.032	2.043
22	透长石	0.021	0.030	0.022	1.547
23(L)	透长石	0.010	0.015	0.006	1.649
24(U)	石英	0.047	0.061	0.084	1.008
24(L)	石英	0.015	0.013	0.029	1.393
25(U)	石英	0.067	0.046	0.078	1.329
25(L)	透长石	0.064	0.123	0.063	1.550
26	石英	0.052	0.126	0.062	1.760
27	透长石	0.015	0.030	0.030	2.285
28(U)	石英	0.048	0.119	0.077	1.346
28(L)	透长石	0.060	0.129	0.072	1.359
29(M)	透长石	0.058	0.036	0.075	2.101
29(U)	石英	0.007	0.137	0.097	3.129
29(L)	石英	0.004	0.146	0.112	3.068
30(U)	透长石	0.044	0.082	0.029	1.425
31(L)	石英	0.024	0.034	0.031	1.021
32	透长石	0.027	0.016	0.012	1.545
33(U)	透长石	0.022	0.042	0.049	1.577
34(U)	石英	0.041	0.029	0.027	1.473
35	透长石	0.020	0.045	0.036	1.779
36	石英	0.017	0.024	0.027	0.792
37(L)	透长石	0.038	0.035	0.036	1.021
Agung	(印尼)	0.038		0.061	1.16
Campanian	(意大利)	0.002		0.041	0.03
Krakatau	(印尼)	0.004		0.015	3.09
St. Helens	(美国)	0.004		0.006	4.91
Tambora	(印尼)	0.007	0.063	0.089	3.07
天池火山	(中国)	0.021	0.086	0.091	3.66
Pinatubo	(菲律宾)	0.003			4.06

a) 样号同表 1. 其他火山喷出气体数据来自文献[1, 3, 14]

旋回火山喷出的挥发分气体含量较高的喷发(如 29~25 层内的火山喷发)次数较多, 延续时间较长(如 29~25 层的厚度为 166 cm); 相反, 第二旋回中喷出气体含量较高的火山喷发(如 18(6)层内的火山喷发)次数较少, 延续时间也较短(18(6)层约为 32 cm). 作为非正常集群死亡事件记录的脊椎动物化石层主要分布在上述喷出挥发分气体含量较高的火山喷发所对应的区间内, 即发掘剖面的 29~25 层(第一旋回)和 18(6)层(第二旋回)内(图 3). 综上所述, 第一旋回高含量火山喷出气体的喷发次数多, 相对应地同期间内高密度脊椎动物化石构成的化石层数量较多(图 3), 持续时间也较长; 第二旋回高含量火山喷出气体的喷发次数较少, 相对应地该期间内高密度脊椎动物化石层的数量较少(图 3), 持续时间较短. 并且, 高密度脊椎动物化石层内的火山碎

屑物对应的喷发喷出的火山气体含量较高; 反之亦然. 这些特征说明: (1) 具高含量火山喷出气体的喷发与脊椎动物化石层所代表的非正常集群死亡事件之间在时间上存在着耦合关系. (2) 两个旋回之间火山喷出气体组分的含量及组合存在差异, 对应的脊椎动物化石组合也存在着差别. 例如, 与第一旋回不同, 第二旋回内没有出现火山喷出气体成分以 $F > Cl$ 的卤化物为主的喷发(详见后述), 相应地也很少出现孔子鸟化石. 这暗示了火山喷出气体的成分、含量及其组合的古气候、古环境效应是造成本区脊椎动物集群死亡的主要原因.

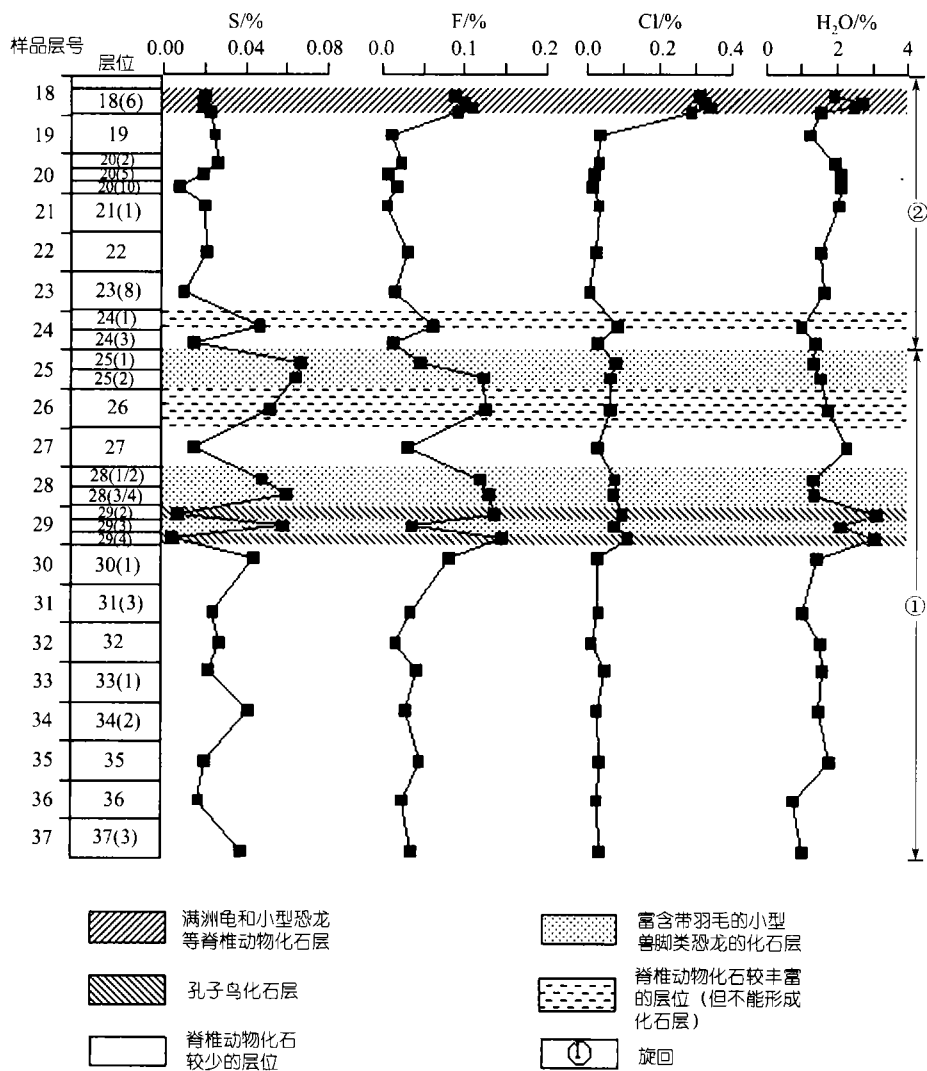


图 3 火山喷出气体的含量及其与脊椎动物化石组合的对应关系

目前, 火山学家研究地史时期火山活动对古气候和古生物生存环境影响的主要方法^[1,2]是, 在获得古火山喷出气体和气溶胶成分、含量的基础上, 通过与现代活火山或历史时期有记载的火山喷发的规模和气候、环境效应(喷发柱高度、喷发物总体积、火山喷出气体和气溶胶组成

与含量、火山喷发对气候和生物生存环境影响程度等)比较,以已知的火山喷发对气候和生物生存环境的影响为参照标准,具体评价地史时期火山活动对古气候和古生物生存环境的影响。本文将遵循这一“将今论古”的研究方法具体探讨辽西地区上述湖相沉积物内中酸性火山空降物质所代表的火山喷发对当时古气候变化和脊椎动物生存环境的影响及其机理。通过分析研究区火山气体组成(图 3 和表 2),可将其喷出的火山气体分为下述三个成分不同的气体组合,它们对应着火山气候学^[1]中三类气候、环境效应明显不同的火山喷发。

4.1 以 $F > Cl$ 的卤族气体为主的火山喷发对古气候和古脊椎动物生存环境的影响

现代活火山观测表明,火山喷发喷出的 F 主要以 HF 气体的形式存在,其主要的环境效应是导致动物窒息和污染陆地植被^[16]。大规模以卤族气体 HF 为主的爆发性喷发会形成由炽热火山灰(尘)、水蒸汽与 HF 气体组成的、规模巨大的火山灰云,这些有毒的火山灰云在大气圈中迅速扩散,最终导致气候和环境的快速变化,造成所影响范围内生物(包括陆地和空中生物)的大规模死亡^[16]。例如,位于巴布亚新几内亚的 Lamington 火山(喷发物以粗面岩、英安岩和流纹岩组合为主)在 1951 年 1 月 15 日的喷发形成了规模巨大、富含火山灰(尘)和卤族气体 HF 的火山灰云幕,炽热的火山灰云迅速横向扩散,同时呈蘑菇状快速上升,火山喷发柱的最大高度达 15 km,它导致被火山灰云“淹没”的大批飞行鸟类突然死亡,并且污染和毁灭了附近 230 km² 范围内的动植物,共造成约 3000 人因有毒气体(HF 等)的火山灰云窒息而丧生^[1,2,16]。

辽西四合屯发掘剖面 29(2)和 29(4)层化石群(图 3)富含孔子鸟化石^[4],是该区最富集的化石层之一。孔子鸟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,表明为成群飞翔鸟类非正常死亡事件的产物^[5,6]。从这些化石层内火山碎屑极细的粒度、以爆发性火山空降物为主及其大面积的空间分布范围判断,形成 29(2)和 29(4)层内火山碎屑的喷发规模大,爆发性强。显微观察表明,这些富含孔子鸟的化石层中火山尘(dust)含量较高(达 15%~20%)。由表 2 和图 3 可以看出,与 29(2)和 29(4)层对应的火山喷发喷出的气体成分以卤化物为主,并且 F 含量大于 Cl,构成以 HF 为主体的卤化物火山喷出气体组合,同时火山喷出的水蒸汽含量也很高(图 3)。上述特征表明,形成孔子鸟化石层内火山碎屑的喷发具备产生大规模含有毒气体(如 HF 等)火山灰云的物质条件。并且,29(2)和 29(4)层内火山碎屑的成分(图 2)与上述 Lamington 火山喷发物的成分^[1,16]基本一致,后者曾导致大量飞行鸟类的突然死亡。因此,有理由认为,四合屯剖面 29(2)和 29(4)层中高密度保存完好的孔子鸟化石(图 3)是由于同时期火山喷发形成的富 HF 气体的火山灰云造成当时大量孔子鸟群在飞行过程中窒息而集群死亡的结果。

4.2 以 $Cl > F$ 的卤族气体为主的火山喷发对古气候和古脊椎动物生存环境的影响

这类火山喷发的气体组成特征是,卤族气体含量较高,并且 $Cl > F$ 。研究表明,此类火山喷发喷出大量的 Cl,火山喷出的 Cl 主要以 HCl 和 Cl₂ 气体形式存在^[1,3],它们的主要环境效应是导致臭氧层破坏,甚至形成“臭氧洞”,严重破坏生态平衡^[1,3,17],最终使动植物因接受过量紫外线辐射而大规模死亡^[1]。其次,火山成因的 HCl 气体还会形成酸雨^[17],造成陆地(包括湖泊中)动植物因酸雨的侵袭而死亡^[17]。晚第四纪以来,属于该类的典型喷发为发生在公元 1199/1200 年的我国长白山天池火山喷发和发生在公元 1815 年的印度尼西亚 Tambora 火山喷发,其喷发物的成分分别为碱流岩^[3]和响岩^[14],火山喷出的 Cl 的含量分别高达 0.091%和 0.089%(表 2)。它们是晚第四纪以来对大气臭氧层破坏最严重的火山活动,并且伴随着喷发,

形成了大面积酸雨^[1-3]。其综合环境效应是导致同时期大面积的生物(包括陆地、湖泊中的生物)毁灭性死亡,并且不会快速出现适应辐射效应^[1,17]。

四合屯发掘剖面 18(6)层记录了一次本区最大规模的脊椎动物集群死亡事件(图 3),化石包括满洲龟、翼手龙和鸚鵡嘴龙(主要包括 *Manchurochelys* sp., *Pterodactyloidea* gen. et sp. nov., *Psittacosaurus* sp.)等^[4,6],它们产于富含火山灰(尘)的灰黑色页岩中,化石层被火山凝灰岩覆盖。令人费解的是,在这一大规模脊椎动物化石层之上,迄今没有发现任何脊椎动物化石^[5,6]。由于这期间玛珥湖的沉积环境没有发生明显的改变^[15],上述现象可能暗示了在 18(6)层之上本区脊椎动物的突然消失。野外研究表明,火山凝灰岩及其下伏含化石层凝灰质页岩的分布范围较广,且层位稳定,其厚度也相对较大,代表了本区一次规模较大的火山喷发。显微观察显示,18(6)层富含脊椎动物化石的灰黑色凝灰质页岩中火山碎屑与上覆凝灰岩中的火山碎屑光性特征完全一致,只是火山碎屑的粒度和含量不同,由下到上火山碎屑物的含量逐渐增加,粒度逐渐增大,但是两者之间不存在明显的接触界线和间歇面。电子探针测试结果表明,两者斑晶中岩浆包裹体和基质玻璃的成分相同(表 1),因此认为,它们应属于同期火山喷发的产物。由火山喷发物的气体成分和含量(表 2 和图 3)可知,该火山喷出的气体成分以卤族气体为主,并且喷出的 Cl 的含量高于 F 的含量,属于火山气候学中以 Cl>F 的卤族气体为主的火山喷发。另外,18(6)层内火山碎屑的成分(图 2)与上述晚第四纪以来该类典型喷发形成的喷发物的成分^[1-3]相近。参照和类比晚第四纪以来此类火山喷发对古气候和生物生存环境影响的研究结果^[1-3,17],本文认为,四合屯这期大规模火山喷发喷出的大量 HCl 和 Cl₂ 气体(图 3)破坏了当时的大气臭氧层,大量以 HCl 为主的火山气体形成酸雨,严重影响同时期生物生存的生态环境。上述各种影响的综合效应造成了本区脊椎动物大规模集群死亡,火山喷发形成的大量火山灰级沉积物,使脊椎动物尸体快速埋藏,形成上述的 18(6)化石层(图 3)。与晚第四纪此类火山活动^[1-3,17]类似,由于与 18(6)层对应的火山喷发对古环境的毁灭性破坏(主要是对臭氧层的破坏),导致本区 18(6)化石层之上脊椎动物突然消失,没有再快速出现适应辐射效应,因此在此层之上的近 5 m 内没有发现任何脊椎动物化石。

4.3 以硫化物气体为主的火山喷发对古气候和古脊椎动物生存环境的影响

第四纪以来(包括历史时期和现代)大部分火山喷发喷出的气体成分以硫化物为主^[1,2]。这是导致早期火山气候学家提出“火山活动造成气候变冷”这一现在看来不完全正确的观点^[1,18]的主要原因之一。目前研究认为,以硫化物气体为主的火山喷发对气候和生物生存环境的影响主要体现在如下几方面^[1,2,16,17]:(1)火山喷出的硫化物气体(H₂S, SO₂ 和 SO₃ 等)造成地表温度快速降低,使某些生物不能适应新的气候、环境变化而死亡。火山硫化物气体导致地表温度降低的机理是,大量硫化物气体随火山喷发柱进入大气圈(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 2SO₂ + O₂ → 2SO₃, SO₃ + H₂O → H₂SO₄ 等),形成浓密的火山 H₂SO₄ 气溶胶层,它们吸收太阳辐射,使到达地表的太阳总辐射量大幅度减小,最终的结果是导致地表温度骤然下降,甚至产生“火山冬天”效应^[18]。据历史记载和古气候研究,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,许多地方的庄稼因气温低而无法成熟,导致了 1816 年的“无夏之年”,造成附近 Sumbawa, Lombok 和美国东北部地区数千头牛羊和大量植物死亡,并且导致 8 万多人死于这场灾难^[2]。(2)火山成因的 H₂SO₄ 气溶胶会加速大气圈中臭氧浓度降低,甚至导致臭氧层破坏。主要包括两种途径。其一,

现代火山气候学研究^[1,19]表明,大气圈内导致臭氧浓度减小的光化学反应主要发生在大气层微尘颗粒表面.如上所述,以硫化物气体为主的火山喷发会在大气圈中形成浓密的火山 H_2SO_4 气溶胶微滴,增加了产生上述光化学反应的表面积,从而促进了大气圈中导致臭氧浓度减小的多相光化学反应进程,加快了大气圈臭氧浓度降低的速度,促进了臭氧层减薄和“臭氧洞”的出现.其二,在火山喷出的硫化物气体氧化形成硫酸气溶胶的过程中会导致大气圈中 O_2 的浓度降低,因此造成臭氧光解反应($\text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$)速率增加和生成速率相对减小,从而导致大气圈中臭氧总量减少^[20].例如,1991年菲律宾 Pinatubo 火山(喷发物为英安岩)喷发至平流层的气体成分以硫化物为主.研究表明,Pinatubo 火山喷发形成的大量硫酸气溶胶导致1992年秋季南极上空“臭氧洞”面积骤然增加^[19].目前对于它造成的“臭氧洞”面积增大引起的气候和环境效应尚在探讨之中^[1,2].(3)火山喷出的硫化物气体在大气圈中溶于水蒸汽,也会形成酸雨沉降于地面,从而对生物的生存环境产生危害^[17].

发掘剖面 25(1), 25(2), 28(1/2), 28(3/4)和 29(3)层代表了五次典型的富含带羽毛小型兽脚类恐龙的集群死亡事件^[4-7].野外观察和室内鉴定表明,富含小型兽脚类恐龙化石的化石层赋存在火山凝灰岩和凝灰质页岩中,其相应火山喷出气体的成分均以硫化物为主(表 2 和图 3).参照和类比上述晚第四纪以来以硫化物喷出气体为主的火山喷发造成的气候和环境效应,可以认为四合屯地区这些以陆地爬行动物化石为主的化石层(图 3)是由于同时期富硫的火山喷发造成了地表温度快速降低、形成酸雨甚至可能破坏了臭氧层,从而使这些脊椎动物不能适应古气候、古环境的骤然变化(如地表温度的快速下降)或/和身体遭到损坏(皮肤受酸雨的侵蚀、过量的紫外辐射造成疾病等),最终大规模集群死亡,随后被火山灰快速覆盖、埋藏的结果.

由此可见,以中酸性为主的爆发性火山喷发是导致辽西四合屯附近脊椎动物集群死亡的主要原因.火山活动进入大气圈的物质成分(例如,火山喷出气体的成分和相对比例、火山灰(尘)的含量、酸雨的成分与比例、气溶胶的含量等)不同,引起的气候和环境效应也存在差别,最终导致集群死亡的脊椎动物组合也存在差异.随后,火山喷发形成的火山灰沉降下来,会迅速覆盖、埋藏脊椎动物尸体,因此将不同种类(或组合)的脊椎动物化石完整地保存下来.

图 3 中其他含脊椎动物化石的层位(如 24(1)和 26 层)内火山碎屑对应着上述三种火山喷发之间的过渡类型,因此它们包含了不同种类的脊椎动物化石.除上述特征外,从图 3 还可以看出:(1)本区大规模的喷发(如 18(16)化石层所对应的火山喷发)或者多次频繁的中等规模火山喷发(如 29~25 层之间的多次火山喷发)都能造成大规模脊椎动物集群死亡.(2)形成富含 HF 气体大规模火山灰云有如下条件:首先,火山喷出气体成分富 HF 和水蒸汽,并且火山喷发物中火山灰(尘)级的碎屑含量较高.火山灰云是造成本区原始鸟类群(如孔子鸟群等)集群死亡的重要原因.镜下观察显示,发掘剖面 18(16)化石层(图 3)内的火山灰(尘)级碎屑含量较低,尽管这期火山活动喷出的气体成分中 HF 和水蒸汽的含量均较高,但是不能形成火山灰云,这可能是 18(16)层内不含孔子鸟化石的原因.与化石层 25(2), 26, 28(1/2)和 28(3/4)内火山碎屑(岩)对应的火山喷发喷出的气体中 HF 含量也较高,但由于其喷出的水蒸汽含量较低,也不满足形成大规模火山灰云的条件,因此,同样造成这些层位中没有出露原始鸟类化石层.(3)相同种类的脊椎动物化石构成的化石层,其形成机理可能不同.例如,18(6)层与 25(1), 25(2), 28(1/2), 28(3/4)和 29(3)层同样都富含爬行纲化石,并形成化石层,但是导致两者集群死亡的机理不同.与前者对应的火山喷出气体成分以 HCl 和 Cl_2 为主,因此 18(6)层中的爬行类动物大规模死亡

主要是因为火山成因的 Cl 破坏臭氧层造成的; 后者对应的火山喷发喷出的气体成分中硫化物含量较高, 这些化石层主要是由于火山硫酸气溶胶造成地表温度大幅度降低和酸雨侵蚀的结果. (4) 火山喷出的水蒸汽不能直接(或单独)引起气候、环境急剧变化, 造成脊椎动物集群死亡, 但是它会与火山喷出的其他气体发生光化学反应, 形成火山气体化合物, 导致气候和环境快速改变. 水蒸汽的含量不同形成气体化合物的种类也不相同, 最终导致火山喷发对气候和环境影响的方式与程度也不同. 因此, 火山喷出水蒸汽的含量高低也对火山喷发导致的气候变化和脊椎动物生存环境的改变有重要影响. 下面的三个实例可以说明研究区火山成因的水蒸汽在火山喷发的气候、环境效应中的作用. (1) 虽然利用发掘剖面 27 层内火山碎屑物的成分计算的火山喷出的水蒸汽含量(表 2 和图 3)相对较高, 但由于其他火山喷出气体(S, F, Cl 等)的含量均相对较低, 导致其对古气候、古环境的影响很微弱, 因此发掘剖面 27 层中的脊椎动物化石很少(图 3). (2) 如前所述, 化石层 25(2), 26, 28(1/2)和 28(3/4)内火山碎屑代表的火山喷发喷出的水蒸汽含量不足以与富 HF 的气体形成大规模火山灰云. 但是, 其喷出水蒸汽的含量(1.346%~1.760%)符合形成大面积 H₂SO₄ 气溶胶和酸雨的条件^[1,2], 因此这些火山喷发形成了大面积硫酸气溶胶和酸雨, 最终造成生态环境破坏, 导致大规模具羽毛的小型兽脚类恐龙集群死亡. (3) 尽管与化石层 29(2), 29(4)和 18(6)对应的火山喷发喷出的水蒸汽含量均较高, 但由于其他气体的含量和组合不同, 所以形成的火山气体化合物最终的气候和环境效应也存在差异. 如上所述, 它们分别形成火山灰云(如 29(2)和 29(4)层内的喷发)和造成臭氧层破坏(如 18(6)层内的火山喷发), 从而导致 29(2)和 29(4)化石层以孔子鸟化石为主, 而 18(6)化石层以龟鳖、翼龙等其他大批脊椎动物化石为主.

研究表明, 火山喷发会通过以下方式导致其附近湖泊中生物大规模集群死亡^[1,2,17]: (1) 火山喷发形成酸雨, 降低湖水(特别是表层湖水)的 pH 值, 造成浮游生物(特别是对 pH 值变化非常敏感的浮游生物)大批死亡, 使湖中生物链突然中断, 从而导致以浮游生物为食物的鱼类和底栖类等湖中生物大批死亡; (2) 火山活动破坏臭氧层, 导致湖面的紫外辐射增强, 从而造成湖中蓝-绿藻恶性增殖, 使作为鱼类和底栖类食物的浮游生物无法生存, 同样会引起湖中生物链中断, 导致湖泊中大批脊椎动物集群死亡; (3) 水下(或湖底)火山喷发可造成湖底局部地域温度升高、pH 快速变化, 并且火山喷出的某些有害(毒)元素(如 Pb, As, Hg 等)会形成络合物使湖泊底部局部水域内有害元素含量骤然增高, 其综合环境效应会引起湖底生物集群死亡. 四合屯剖面(图 3)中几乎每个层位都含有淡水湖泊水生脊椎动物(如鱼类和龟鳖类)化石^[4-6], 并且在一些鱼和龟鳖类化石层中已经发现湖底火山喷发的证据(如大量湖底喷发形成的火山碎屑物以及具有枕状构造的火山岩等). 由上述可知, 本区火山喷出的气体形成大面积酸雨(如 H₂SO₄, HCl 等), 并且某些喷发导致了臭氧层破坏. 因此可以认为, 辽西四合屯剖面内大量鱼类和龟鳖类化石(层)是由于同时期陆地和 underwater 火山喷发的综合环境效应造成的.

目前已经有成熟的模型计算现代活火山喷发物总体积和喷发柱高度^[1,3], 但是对于地史时期的火山喷发, 由于其喷发物被覆盖、剥蚀, 出露不完整, 因此只能通过与现代或历史时期成分相同(或相近)的火山喷发类比获得其喷发物总体积和喷发柱高度^[1,2]. 辽西四合屯发掘剖面中火山碎屑(岩)的化学成分(图 2)与上述活火山(如 Tambora 火山, Pinatubo 火山, Lamington 火山, 长白山天池火山)喷发物的成分^[1,3,14,16]接近. 因此, 本研究在对发掘剖面中所有层位的火山碎屑进行平均最大粒度与厚度统计的基础上, 利用火山喷发物总体积、喷发柱高度随喷发物

平均最大粒度与厚度之比的变异图解^[1,2], 获得各层位的火山喷发物总体积与喷发柱高度分别为 200~320 km³ 和 18~38 km, 均大于或至少相当于上述活火山喷发物的总体积与喷发柱高度, 并且与本区化石层同时期的火山喷发气体含量(图 3)也大于上述活火山喷出的气体含量(表 2)。因此, 辽西地区中生代火山喷出气体的总量大于这些典型活火山喷出气体的总量。上述活火山喷发都对同时期气候和生物生存环境造成过灾难性影响, 导致了当时的生物大批死亡。所以, 完全有理由认为辽西中生代火山喷发对当时的古气候、古环境变化造成过能够引起脊椎动物集群死亡的灾难性影响, 但其具体机理因火山喷出气体的成分和含量不同而出现差异。

5 结论

(1) 野外观察、显微岩相学研究及火山喷出的气体含量与化石数量的对应关系研究表明, 具高含量火山喷出气体的喷发与脊椎动物化石层所代表的生物集群死亡事件之间存在着内在联系。

(2) 辽西地区与脊椎动物化石层同时期的火山喷出的气体总量高于世界其他地区相同(或相近)成分的活火山喷出气体的总量, 其喷发规模也大于或至少相当于历史时期引起过大规模生物死亡的火山喷发。

(3) 以中酸性成分为主的爆发性火山喷发是导致研究区脊椎动物集群死亡的主要原因。火山活动进入大气圈的物质成分不同, 它们所引起的气候和环境效应也存在差别, 最终导致集群死亡的脊椎动物组合也存在差异。随后, 火山作用形成的火山灰沉降下来, 迅速埋藏脊椎动物尸体, 将不同种类(或组合)的脊椎动物完整地保存为化石。

(4) 按照火山喷出的气体成分和含量, 辽西地区中生代火山喷发可分为三种类型: 1) 以卤族气体($F > Cl$)为主的火山喷发, 它们形成大规模炽热富含有毒气体 HF 的火山灰云, 最终造成大量的孔子鸟窒息而集群死亡, 随后大量的火山灰快速覆盖, 形成孔子鸟化石层。2) 另一类以卤族气体($Cl > F$)为主的火山喷发, 其主要的的环境效应是导致臭氧层被破坏, 并形成大面积酸雨(以 HCl 为主), 最终使动植物接受过量紫外线辐射, 严重破坏生态平衡, 从而导致四合屯发掘剖面 18(6)层中不同种类脊椎动物大规模集群死亡。3) 以硫化物气体为主的火山喷发, 其主要的古气候和古环境效应是导致地表温度快速降低, 形成酸雨(以 H₂SO₄ 为主)和降低大气圈中臭氧的浓度, 从而造成大量爬行动物由于不适应这种变化而大规模集群死亡, 形成以小型兽脚类恐龙化石为主的化石层。

(5) 辽西四合屯发掘剖面自下而上存在的大量鱼和龟鳖类化石(层)是由于陆地上火山喷发导致湖泊中生物链中断和水下火山喷发引起湖底环境剧变的综合效应造成的。

(6) 本区大规模、富含火山气体的喷发或者多次频繁的中等规模火山喷发造成当时脊椎动物的大规模集群死亡。这一结论对我国目前火山灾害与防御的研究具有现实意义, 它要求我们除了高度警惕历史时期有过较大规模喷发的火山(如我国长白山天池火山), 同时还必须对那些第四纪以来具有高频喷发历史的火山和火山群(如吉林龙岗火山群、腾冲火山群等)引起足够的重视, 因为两者都能够导致火山附近地区生物(包括人类)的大规模集群死亡。

致谢 样品的处理和测试得到德国 Kiel 大学 H.-U. Schmincke 教授、比利时 KUL 大学 J. Hertogen 教授、J. Mareels 和 M. Romain 博士的帮助; 成文过程中曾与赵国春博士、储国强博

士进行过有益的讨论。汉景泰研究员、樊祺诚研究员审阅了全文, 并提出建设性修改意见。在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Sigurdsson H. Encyclopedia of Volcanoes. New York: Academic Press, 2000. 1~1384
- 2 Chester D. Volcanoes and Society. London: Edward Arnold Press, 1993. 16~268
- 3 Horn S, Schmincke H -U. Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD. *Bull Volcanol*, 2000, 61: 537~555
- 4 汪筱林, 王元青, 王 原, 等. 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*, 1998, 36(2): 81~101
- 5 汪筱林, 王元青, 徐 星, 等. 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*, 1999, 45(增刊): 458~467
- 6 汪筱林, 王元青, 金 帆, 等. 辽西北票四合屯脊椎动物化石组合及其地质背景, 热河生物群, 第 11 号. 合肥: 中国科技大学出版社, 1999. 310~327
- 7 郭正府, 汪筱林. 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. *岩石学报*, 2002, 18(1): 117~125
- 8 陈义贤, 陈文寄. 辽西及邻区中生代火山岩. 北京: 地震出版社, 1997. 201~217
- 9 Swisher C C, Wang Y-Q, Wang X-L, et al. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 1999, 400: 58~61
- 10 Devine J D, Gardner J E, Brack H P, et al. Comparison of microanalytical methods for estimating H₂O contents of silicic volcanic glasses. *Am Mineral*, 1995, 80: 319~328
- 11 郭正府, 刘嘉麒, 隋淑珍, 等. 白头山火山公元 1199/1200 年喷发的火山气体总量估算及其意义. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(8): 668~676
- 12 Irvine A J, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can J Earth Sci*, 1971, 8: 523~548
- 13 Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Oxford: Blackwell, 1989. 1~193
- 14 Devine J D, Sigurdsson H, Davis A N. Estimates of sulfur and chlorine yield to the atmosphere from volcanic eruptions and potential climatic effects. *J Geophys Res*, 1984, 89: 6309~6325
- 15 Liu J, Chu G, Liu T. Fossil-rich Early Cretaceous maars in Liaoxi, Northeast China. *Terra Nostra*, 2000, 6: 274~278
- 16 Decker R, Decker B. Volcanoes. New York: Freeman and Company, 1989. 172~222
- 17 Wingnall P B. Large igneous provinces and mass extinctions. *Earth-Science Rev*, 2001, 53: 1~33
- 18 Rampino M R, Self S, Stothers R B. Volcanic winters. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1988, 16: 73~99
- 19 Brasseur G, Granier C. Mount Pinatubo aerosols, chlorofluorocarbons and ozone depletion. *Science*, 1992, 257: 1239~1242
- 20 Prather M. Catastrophic loss of stratospheric ozone in dense volcanic clouds. *J Geophys Res*, 1992, 97(D9): 10187~10191