

辽西四合屯中生代脊椎动物集群死亡、快速辐射及其成因探讨*

郭正府 刘嘉麒

汪筱林

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

摘要 东北辽西热河群义县组下部湖相地层中含有十余个保存完好的脊椎动物化石层, 它们全部赋存在中酸性火山凝灰岩夹层中。选择其中4个化石数量大、密度高并且其赋存的凝灰岩较新鲜的层位, 在对火山凝灰岩进行野外、显微岩相学和岩石化学研究的基础上, 开展了斑晶矿物中岩浆包裹体和基质玻璃化学成分和挥发分气体含量的电子探针分析。结果表明, 辽西地区火山喷出气体的含量高于世界上其他地区相同成分的火山喷出气体的含量; 火山喷出气体的组成与相应的化石层之间存在着对应关系。因此认为, 火山活动是导致当时辽西地区气候快速变化的主要因素之一; 频繁的火山活动一方面造成大规模脊椎动物突发性集群死亡, 另一方面在火山喷发间歇期又能够促进陆地和河湖中的动植物迅速复苏、繁衍, 最后进入新的鼎盛时期。辽西中生代独特的火山活动方式和喷发物成分在本区脊椎动物的发生、生长发育、繁盛、集群死亡、埋藏、化石保存和快速复苏等多次近于螺旋式演化历程中起了十分重要甚至可能是关键性的作用。

关键词 集群死亡 快速辐射 脊椎动物 火山气体 火山灰 辽西

近年来, 在辽西北票四合屯及其周边地区热河群义县组下部的湖相地层中, 发现了十余个保存完好的脊椎动物化石层^[1,2]。其主要的化石包括鱼类、两栖类、爬行类(如龟鳖类、长毛的小型兽脚类恐龙等)、鸟类和哺乳类^[2,3]。另外, 在这些化石层中还含有大量保存完好的无脊椎动物和植物化石(如双壳类、腹足类、介形类、叶肢介、昆虫、轮藻和被子植物)等^[3]。它们共同组成著名的热河生物群^[3]。上述化石层均赋存在中酸性火山凝灰岩夹层中^[2]。近期对这些保存异常完整的脊椎动物化石及其组合的深入研究, 已经为鸟类、哺乳类和被子植物的起源、鸟类飞行的起源以及鸟类与恐龙的系统关系等涉及生物演化的一些重大问题提供了重要证据^[3]。但是, 目前对于这一生物群发生、发展、多次大规模突发性死亡直至灭绝和紧随其后的快速复苏和辐射适应及其与古气候、古环境演变的关系以及热河生物群生存时期驱动辽西及其邻区古气候、古环境演变的主导因子的研究还相当薄弱。然而, 这方面的工作将为进一步探讨热

河生物群的特征和演化提供新的科学依据。

本文主要研究辽西四合屯发掘剖面中含脊椎动物化石层的火山凝灰岩, 测定与它们对应的火山喷出气体、气溶胶的成分和含量, 并在此基础上分析了它们的古气候和古环境效应。结果表明, 同时期火山活动导致的古气候、古环境大幅度变化是造成辽西脊椎动物集群死亡以及促进其快速辐射的主导原因。

1 地质背景和脊椎动物化石层的特征

辽西北票四合屯位于我国东北中生代金岭寺-羊山断陷盆地内^[1], 近年来发现的大量脊椎动物化石出露于义县组湖相沉积地层的中酸性火山凝灰岩夹层中。岩石学研究表明, 四合屯发掘剖面内数十层中酸性凝灰岩指示了岩浆房的脉动式喷发特征^[4]。空间上, 湖相地层呈北东向展布; 在剖面上, 这套湖相地层覆盖在中基性熔岩(玄武岩-安山岩)之上(图1)。含脊椎动物化石层的凝灰岩中透长石斑晶的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为124.6 Ma^[6]。迄今, 四合屯发掘剖面内已经

2002-12-25 收稿, 2003-03-24 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49972030)资助项目

E-mail: zfguo@mail.igcas.ac.cn

发现十余个化石密度大、数量较多的脊椎动物化石层^[5]，另外，在化石层之间还发现有大量产自凝灰岩层内的脊椎动物化石。四合屯发掘剖面中的脊椎动物化石均出露在厚度约7m的湖相地层内^[1]。地层和古生物学研究表明，四合屯及其邻区发掘剖面中脊椎动物化石层内的化石具有如下特点：

(1) 化石层中脊椎动物化石的数量大、密度高，并且这些化石往往成群紧密地排列。统计结果表明，四合屯发掘剖面下部的孔子鸟化石层中鸟化石的密度平均为每5~6m²1件，在局部范围内高达每1~2m²1件^[1,2]。

(2) 化石层内一些脊椎动物化石的形态异常。如满洲龟的颈前伸，头骨和四肢最大限度地伸出甲壳之外；大量孔子鸟前后肢直伸，尾羽伸展，鸟的

颈部尽可能向正前方伸展等^[1]。

(3) 除剖面下部的孔子鸟化石层几乎均由孔子鸟化石组成外，其他化石层内出现多类脊椎动物(例如鱼类、两栖类、爬行类和鸟类等)化石共存的现象，并且成年个体化石与个体较小的幼体化石紧密共生在一起。例如，在辽西凌源附近的化石出露点，同一岩板上保留了多个保存完好的、个体大小相差悬殊的潜龙化石，另外在潜龙的周围还有许多狼鳍鱼化石^[3]。

(4) 化石层中保存有典型的脊椎动物非正常死亡前的瞬间呈现出的“奇特造型”和“生存方式”的化石记录。例如，在辽西凌源市宋杖子乡(原大王杖子乡)发现的潜龙标本的嘴边有一条狼鳍鱼，紧靠其吻部，似乎一张嘴就能将其吞进嘴里^[3]。上述脊椎动物化石的各种特征暗示了它们为非正常集群死亡的结果。

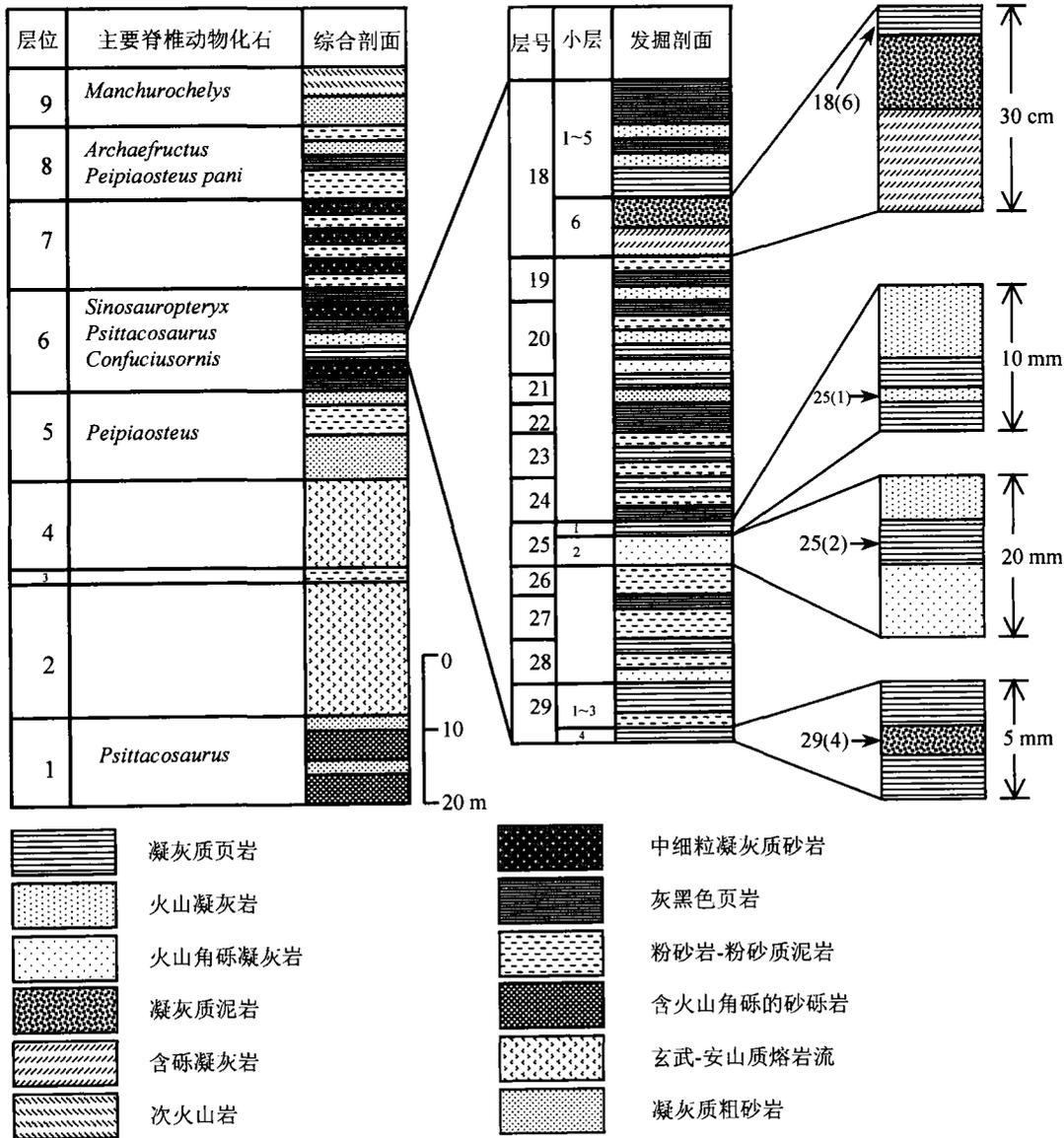


图1 四合屯发掘剖面和样品的层位图(据文献^[2,5]修改)

2 火山喷发造成辽西脊椎动物集群死亡的野外证据

首先,从时间上看,在整个热河生物群的生存时期,辽西及其邻区发生了大规模火山活动,形成了大面积火山岩;在热河生物群的鼎盛期,辽西及其邻区的火山活动也达到了高潮,其喷发方式以大规模爆发性火山活动为主,形成大面积中性和酸性火山熔岩和火山碎屑岩^[7-9]。另外,在空间上,热河生物群的分布范围和迁移特征^[7,10,11]与上述相应的火山岩的空间分布特征和迁移特点吻合^[12]。其次,四合屯附近化石密度大并且保存完好的脊椎动物化石层都出露在义县组湖相地层内的火山凝灰岩和/或凝灰质页岩(或泥岩)夹层中(图1),发掘剖面内保存的数十层火山碎屑岩夹层真实地记录了当时频繁的火山活动,并且指示脊椎动物的集群死亡与火山活动具同时性。再次,四合屯发掘剖面的下部(即图1中18层以下的层位)包含了所有的脊椎动物化石层,相应地这期间内火山活动也最强烈,出现了数十层火山凝灰岩;但在18层(图1)之上至今没有发现任何脊椎动物化石(层),其火山凝灰岩层也很少^[1,5]。最后,火山凝灰岩内一些具奇特形态的生物化石暗示了火山活动可能是造成热河生物群集群死亡的主要原因。例如,(1)发现于四合屯附近发掘剖面中的秀丽郝氏翼龙化石,两翅展开,它的右前肢的翼指骨被自己咬在嘴里^[3,13]; (2)产于辽西凌源宋杖子乡义县组凝灰质页岩中的娇小辽西鸟化石,呈现出欲展翅飞翔,但又显得力不从心、无可奈何的埋葬姿态^[14]。上述所有这些会飞的脊椎动物化石形态特征可能是由于火山喷出的火山灰、有毒气体及其气溶胶导致生物中毒,在死亡过程中痛苦挣扎所致。

3 化石层位和样品采集

本研究在上述野外观察的基础上,选择四合屯发掘剖面中4个保存完好、化石密度最大、数量最多的脊椎动物化石层,以其赋存的火山碎屑岩(包括火山凝灰岩、角砾凝灰岩、凝灰质角砾岩、凝灰质泥岩和凝灰质页岩等)作为研究对象,测定与其对应的火山活动喷出气体的成分和含量。4个化石层及其赋存的地层层序(图1)与特征^[2,5]如下:化石层29(4)是四合屯及其附近地区最富集的脊椎动物化石层之一,该层中几乎所有的化石均为孔子

鸟,它们保存在1~2 mm厚的凝灰质泥岩中,上覆和下伏地层均为凝灰质页岩,岩层之间的接触界限不明显,其中火山碎屑的含量呈渐变关系。化石层25(2)构成图1中25层的下部,所含的化石主要包括鱼类、龟鳖类、长毛的小型兽脚类恐龙和无脊椎动物。化石层赋存在5 mm厚的灰黑色凝灰质页岩中,上覆灰黑色英安质凝灰岩,下伏地层为角砾凝灰岩。化石层25(1)位于发掘剖面25层的上部(图1),化石产自5 mm厚的凝灰质页岩中,页岩被5 mm厚的凝灰岩覆盖,在含脊椎动物化石的页岩中夹有一层1~2 mm厚的火山凝灰岩,该层的主要化石包括鱼类和长毛的小型兽脚类恐龙。总之,25(1)和25(2)内的主要脊椎动物化石均为陆地爬行类动物。脊椎动物化石层18(6)是四合屯发掘剖面中最上部的脊椎动物化石层,它赋存在至今本区发现最厚的、规模最大的、富含脊椎动物化石的火山凝灰岩中。凝灰岩厚30 cm(图1)。纵向剖面上由3部分组成:下部为含砾凝灰岩(15 cm厚),中部为凝灰质泥岩(10 cm厚),上部为凝灰质页岩(5 cm厚)。脊椎动物化石(包括满洲龟、翼手龙和鹦鹉嘴龙等^[1])出露在上部的凝灰质页岩中。该化石层的上覆地层为火山凝灰岩和角砾凝灰岩。

4 测试方法和结果

在实验室对野外采集的火山碎屑岩进行观察、对比和初步筛选,然后利用显微镜挑选出新鲜的、用于测试的岩石样品。样品的处理程序如下:首先将火山碎屑岩粉碎,然后用重液分离火山玻璃和不同成分的斑晶(或晶屑)。在双目显微镜下挑选新鲜的斑晶(或晶屑)、玻屑和浆屑,用蒸馏水将火山碎屑冲洗干净,观察斑晶矿物中岩浆包裹体的分布、大小、形态和含量。然后将待测样品(火山玻璃、斑晶矿物)与标样一起用树胶镶嵌在载玻璃板上,抛磨样品,并同时不断地用显微镜观察斑晶矿物,直至矿物表面暴露出岩浆包裹体的剖面。利用电子探针(Cameca SX50)测试岩浆包裹体和基质玻璃的主要氧化物成分以及Cl, F和S的含量。测试过程中选定工作电压15 kV,电流5~20 nA,束斑直径分别为1 μm (斑晶)、1~10 μm (包裹体)和15~20 μm (基质玻璃)。水的含量通过“差异法”^[15]获得。该研究程序通过调节束斑直径(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)^[16]是一种高精度的定量测定火山挥发性气体组分的方法^[17]。各挥发性元素和组分的相对分析误差分别为<5%(S), <3%(F), <4%(Cl)和<5%(H₂O)。

岩石学研究^[16,17]表明,火山岩内斑晶矿物中原生岩浆包裹体属于斑晶结晶过程中捕获的周围熔浆,其原始成分代表了矿物结晶时与斑晶平衡的熔浆组成;火山喷发物中与斑晶共存的新鲜基质玻璃的成分代表了经过火山喷发脱气之后的熔浆成分,

基质玻璃的挥发分组成代表了喷发后熔浆中残存的火山气体成分。模拟实验和热力学计算结果显示,火山喷出气体含量的最小值等于喷发前演化至最晚期的岩浆(即晚期斑晶中岩浆包裹体)中挥发分的含量减去喷发后与斑晶共存熔浆(现为基质玻璃)中残留的火山气体的含量^[17,18]。野外观察和显微岩相学研究^[4]表明,在辽西四合屯发掘剖面内脊椎动物化石层所赋存的火山碎屑岩中,其岩浆演化至晚期阶段结晶的斑晶矿物为透长石和石英。这些晚期斑晶中岩浆包裹体和基质玻璃的化学成分与挥发分组分(S, F, Cl, H₂O)的含量见表1。

表1 火山岩中岩浆包裹体和基质玻璃的化学成分(%)

样号	样品	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	总量	H ₂ O
29(4)	Sanid	65.29	0.67	14.95	1.98	0.04	1.91	2.11	2.98	3.64	0.31	0.044	0.191	0.134	94.249	5.751
29(4)	Sanid	67.02	0.42	14.11	1.68	0.02	1.11	1.78	3.97	4.35	0.51	0.037	0.263	0.153	95.423	4.577
29(4)	Sanid	67.05	0.12	13.82	2.63	0.05	0.72	1.28	3.31	5.01	0.67	0.032	0.253	0.164	95.109	4.891
29(4)	Qz	66.42	0.33	14.47	1.79	0.05	1.39	2.18	3.62	4.14	0.57	0.037	0.275	0.112	95.384	4.616
29(4)	Qz	66.14	0.57	13.79	1.83	0.03	1.47	2.37	3.49	4.75	0.65	0.034	0.264	0.134	95.522	4.478
29(4)	Qz	67.49	0.21	14.56	1.77	0.04	1.16	2.31	4.02	4.85	0.28	0.036	0.258	0.142	97.126	2.874
29(4)	Glass	68.92	0.21	14.92	0.93	0.04	0.85	1.33	4.07	5.62	0.43	0.031	0.111	0.051	97.513	2.487
29(4)	Glass	68.77	0.18	14.66	1.17	0.08	0.58	1.52	4.49	5.72	0.38	0.029	0.123	0.055	97.757	2.243
29(4)	Glass	67.98	0.32	14.79	1.28	0.03	0.81	1.44	4.21	5.46	0.37	0.031	0.121	0.061	96.903	3.097
25(1)	Sanid	57.38	0.89	16.39	5.95	0.16	3.87	3.89	3.17	3.41	0.62	0.116	0.159	0.161	96.166	3.834
25(1)	Sanid	57.49	0.82	16.13	5.28	0.11	3.58	4.05	3.43	3.36	0.39	0.126	0.132	0.157	95.055	4.945
25(1)	Sanid	58.84	0.81	16.19	4.63	0.09	3.32	3.87	3.68	3.85	0.57	0.095	0.145	0.137	96.227	3.773
25(1)	Qz	58.39	0.77	15.79	4.82	0.12	4.11	3.96	3.21	3.42	0.56	0.108	0.168	0.166	95.592	4.408
25(1)	Qz	58.68	0.72	16.01	5.84	0.13	3.76	3.69	3.58	3.62	0.61	0.112	0.176	0.165	97.093	2.907
25(1)	Qz	59.08	0.82	15.31	5.89	0.09	3.32	4.09	2.99	3.38	0.56	0.089	0.171	0.179	95.969	4.031
25(1)	Glass	59.72	0.51	15.78	4.88	0.08	2.75	3.36	4.89	5.94	0.68	0.032	0.125	0.092	98.839	1.161
25(1)	Glass	60.11	0.56	15.72	4.86	0.05	2.27	3.41	5.16	5.82	0.77	0.021	0.128	0.088	98.967	1.033
25(1)	Glass	60.29	0.48	15.69	4.95	0.07	2.16	3.27	5.09	5.85	0.52	0.024	0.132	0.097	98.623	1.377
25(2)	Sanid	57.68	0.84	16.22	5.31	0.12	3.26	3.91	3.25	3.45	0.38	0.138	0.154	0.162	94.874	5.126
25(2)	Sanid	58.22	0.81	16.01	5.04	0.15	3.39	4.58	3.37	3.97	0.68	0.136	0.165	0.166	96.687	3.313
25(2)	Sanid	59.79	0.73	15.79	5.21	0.13	3.14	4.12	3.41	4.36	0.52	0.096	0.177	0.163	97.636	2.364
25(2)	Qz	59.63	0.75	15.34	5.02	0.08	3.03	4.11	3.52	4.49	0.61	0.127	0.184	0.155	97.046	2.954
25(2)	Qz	59.52	0.78	15.15	4.52	0.12	3.24	4.27	3.46	4.34	0.49	0.132	0.182	0.163	96.367	3.633
25(2)	Qz	60.43	0.67	15.05	4.38	0.09	3.11	4.06	3.66	4.56	0.48	0.111	0.179	0.171	96.951	3.049
25(2)	Glass	60.16	0.32	15.93	4.62	0.05	2.17	3.61	5.06	5.94	0.49	0.022	0.124	0.094	98.590	1.410
25(2)	Glass	60.43	0.44	15.82	4.55	0.07	2.09	3.58	4.99	5.88	0.76	0.024	0.146	0.089	98.869	1.131
25(2)	Glass	60.28	0.37	15.72	4.49	1.01	2.22	3.60	4.75	5.46	0.42	0.023	0.135	0.094	98.572	1.428
18(6)	Sanid	61.48	0.66	15.11	4.52	0.12	2.33	3.89	3.75	4.23	0.56	0.061	0.211	0.347	97.269	2.731
18(6)	Sanid	61.39	0.70	15.03	4.29	0.09	2.24	3.87	3.65	4.17	0.38	0.064	0.229	0.376	96.479	3.521
18(6)	Sanid	62.41	0.55	15.00	3.49	0.07	1.99	3.18	4.08	4.33	0.35	0.055	0.239	0.408	96.152	3.848
18(6)	Qz	61.55	0.65	15.03	4.39	0.10	2.26	3.74	3.79	4.33	0.41	0.062	0.223	0.385	96.920	3.080
18(6)	Qz	62.29	0.61	15.09	3.87	0.06	1.99	3.38	3.98	4.62	0.61	0.052	0.231	0.412	97.195	2.805
18(6)	Qz	62.36	0.47	14.69	3.62	0.07	1.92	3.05	4.11	4.51	0.68	0.053	0.244	0.417	96.194	3.806
18(6)	Glass	62.13	0.61	15.61	3.65	0.11	1.79	3.13	4.24	6.28	0.36	0.031	0.126	0.077	98.144	1.856
18(6)	Glass	62.27	0.63	15.58	3.44	0.12	1.83	3.14	4.37	6.54	0.47	0.027	0.135	0.087	98.639	1.361
18(6)	Glass	62.86	0.57	14.85	3.84	0.05	1.69	3.07	4.28	6.34	0.72	0.026	0.139	0.098	98.533	1.467

Sanid: 透长石; Qz: 石英; Glass: 基质玻璃; FeO*: 全铁含量. 测试条件见正文; 测试单位: 比利时 Leuven 大学; 测试者: 郭正府

从表1可以看出,各个层位火山玻璃的主要元素氧化物的成分比较接近;然而,斑晶中岩浆包裹体和基质玻璃的挥发分组含量却差别较大.基质玻璃中挥发分成分的变化范围如下:Cl的质量分数由29(4)层的 510×10^{-6} 至18(6)层的 980×10^{-6} ;F的丰度由29(4)层的 1110×10^{-6} 至25(2)层的 1460×10^{-6} ;S的浓度由25(1)层的 210×10^{-6} 至25(1)层的 320×10^{-6} ;H₂O的含量由25(1)层的1.033%至29(4)层的3.097%.透长石斑晶中岩浆包裹体内挥发分气体成分的变化范围如下:(1340~4080) $\times 10^{-6}$ (Cl), (1320~2630) $\times 10^{-6}$ (F), (320~1380) $\times 10^{-6}$ (S)和2.364%~5.751%(H₂O).石英斑晶中岩浆包裹体内挥发分气体含量的变化范围为:(1120~4170) $\times 10^{-6}$ (Cl), (1680~2750) $\times 10^{-6}$ (F), (340~1320) $\times 10^{-6}$ (S)和2.805%~4.616%(H₂O).表2为利用包裹体和玻璃基质的挥发分含量计算的火山喷出气体的质量分数,可以看出,研究区火山喷出气体具如下特征:

(1)与上述四个脊椎动物化石层(图1)同时期的火山碎屑所代表的火山喷发喷出气体(除H₂O蒸汽外)的含量高于世界其他地区相同(或相近)成分的活火山喷出的相应气体的含量.

(2)化石层中脊椎动物化石的种类相同,对应的火山活动喷出气体组成也接近;化石层中脊椎动物化石的种类差别较大时,其对应的火山活动喷出的气体含量差别也较大.例如,29(4)层内的脊椎动物化石几乎全为孔子鸟,对应的火山喷出气体成分以HF占优势;构成25(1)和25(2)两个化石层的脊椎动物化石均以长毛的小型兽脚类恐龙为主,与其同时期的火山活动喷出的气体成分相近,以硫化物气体(H₂S, SO₂等)为主;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^[1,2],保存的脊椎动物化石主要包括满洲龟、翼手龙和鸚鵡嘴龙(即 *Manchurochelys* sp., *Pterodactyloidea*, gen. et sp. nov., *Psittacosaurus* sp.)等,它们对应的火山喷出气体以HCl为主.

(3)在同一化石层内,利用不同的晚期结晶的斑晶矿物(如透长石和石英)测定的火山喷出气体的成分和含量是相近的,也从一个侧面表明利用晚期斑晶矿物内岩浆包裹体的成分代表火山喷发前岩浆的成分是合理的.

表2 火山喷出气体的质量分数 w/%

样号 ¹⁾	S	F	Cl	H ₂ O	S+ F+Cl	S+F+ Cl+H ₂ O
29(4)	0.014	0.073	0.078	3.142	0.165	3.307
29(4)	0.007	0.145	0.097	1.968	0.249	2.217
29(4)	0.002	0.135	0.108	2.282	0.245	2.527
29(4)	0.007	0.157	0.056	2.007	0.220	2.227
29(4)	0.004	0.146	0.078	1.869	0.228	2.097
29(4)	0.006	0.140	0.086	0.265	0.232	0.497
25(1)	0.090	0.031	0.069	2.644	0.190	2.833
25(1)	0.100	0.004	0.065	3.755	0.169	3.923
25(1)	0.069	0.017	0.045	2.583	0.131	2.713
25(1)	0.082	0.040	0.074	3.218	0.196	3.413
25(1)	0.086	0.048	0.073	1.717	0.207	1.923
25(1)	0.063	0.043	0.087	2.841	0.193	3.033
25(2)	0.115	0.019	0.070	3.803	0.204	4.007
25(2)	0.113	0.030	0.074	1.990	0.217	2.207
25(2)	0.073	0.042	0.071	1.041	0.186	1.227
25(2)	0.104	0.049	0.063	1.631	0.216	1.847
25(2)	0.109	0.047	0.071	2.310	0.227	2.537
25(2)	0.088	0.044	0.079	1.726	0.211	1.937
18(6)	0.033	0.078	0.260	1.170	0.370	1.540
18(6)	0.036	0.096	0.289	1.960	0.420	2.380
18(6)	0.027	0.106	0.321	2.287	0.453	2.740
18(6)	0.034	0.090	0.298	1.519	0.421	1.940
18(6)	0.024	0.098	0.325	1.244	0.446	1.690
18(6)	0.025	0.111	0.330	2.245	0.465	2.710
Agung	0.038		0.061	1.16	0.099	1.259
Campanian	0.002		0.041	0.03	0.043	0.073
Krakatau	0.004		0.015	3.09	0.019	3.109
St. Helens	0.004		0.006	4.91	0.010	4.920
Tambora	0.007	0.063	0.089	3.07	0.159	3.229
Tianchi	0.021	0.086	0.091	3.66	0.198	3.858
Pinatubo	0.003			4.06	0.003	4.063

1) 样号同表1. 其他火山喷出气体的数据来源于文献[16,18,19]

5 辽西中生代火山喷出气体的成分、含量与脊椎动物集群死亡的关系

大规模、爆发性火山活动会将大量的气体、气溶胶和火山灰喷至大气圈(甚至平流层)内,它们在大气圈内迅速扩散并发生光化学反应,能够对当时的气候和环境造成严重甚至灾难性的影响^[20].统计资料显示,历史时期爆发性的活火山活动与短期大幅度的气候快速变化之间存在着较好的对应关系^[21].对现代活火山喷发的实际观测与研究表明,与火山灰相比,火山气体及其形成的气溶胶在大气圈中滞留的时间长,扩散距离远,覆盖范围大,并且它们还会直接与臭氧发生光化学反应,因此对气候和环境的影响比火山灰更严重、更深远^[18,22].不同岩浆成分和喷发类型的火山活动向大气圈输送的气体组成和总量不同,因此其气候效应也存在差

异^[22]. 中酸性、爆发式火山活动喷出的气体成分主要包括 SO₂, H₂S, HCl, Cl₂, HF 和 H₂O 等. 它们进入大气层后对气候和环境会产生如下影响:

(1) 火山成因的 SO₂ 和 H₂S 气体能够在大气圈中通过光化学反应形成硫酸气溶胶, 它们反射和吸收太阳辐射, 最终导致大气圈下部和地表的温度降低^[16]; 其次, 火山成因的硫酸气溶胶能够加快大气圈中导致臭氧浓度降低的光化学反应速度和提高其产率, 从而造成大气臭氧层的破坏^[20]; 另外, 硫化物气体还可以形成酸雨.

(2) 火山活动喷入大气圈中的 HCl 和 Cl₂ 气体, 其主要的环境效应是造成臭氧层破坏^[23].

(3) 火山 HF 气体与水蒸汽以及火山灰一起会在大气圈中形成剧毒的火山灰云, 从而对周围生物产生严重的影响^[18]. 历史时期大规模的火山活动(如 1815 年印度尼西亚的 Tambora 火山喷发、1783 年冰岛的 Laki 火山喷发)曾经对周围地区的气候、环境产生了极其严重的影响, 并造成大批生物(包括人)死亡^[18]. 对火山喷发物总量的统计、对比研究表明, 即使是历史时期最大规模的火山喷发, 与地史时期相比, 也仅仅属于其中的中小规模级的火山活动^[24]. 也就是说, 它们比地史时期大规模火山作用造成的气候、环境效应小得多. 但是, 对历史时期大规模火山活动的气候环境效应研究能够为深入探讨地史时期火山喷发对气候、环境的影响提供参考底限.

火山气候学研究表明, 火山活动对气候和环境的影响主要受如下 3 个因素的制约: 火山喷发的爆发强度和能量、距火山口的距离、火山喷出气体的成分和含量^[16, 18]. 四合屯发掘剖面距黑蹄子沟中生代火山机构仅 3 km, 附近及其邻区出露大面积同时代的火山角砾岩和熔结凝灰岩, 说明当时的火山活动以爆发性喷发类型为主, 喷发能量较大, 并且本区火山喷出的气体含量比历史时期相同成分的活火山高(表 2), 这些活火山均已导致附近地区大批生物(包括人)灾难性死亡^[18, 24]. 另外, 岩相古地理研究显示, 中生代的四合屯位于周围被前中生代岩石露头封闭的、地势低洼的断陷盆地内^[25]. 由于本区火山喷出的主要气体(表 1)密度比空气大, 它们很难向盆地外迅速扩散, 因而主要在盆地内部的上空蔓延, 最终导致盆地内部火山气体的浓度相对较大, 即盆地内的生物受到火山喷发的影响更大. 因此, 有理由认为, 当时的火山喷发对四合屯一带脊

椎动物的生存环境造成了灾难性的影响, 进而导致本区脊椎动物集群死亡, 形成发掘剖面中所见的化石层(图 1). 由于与不同种类脊椎动物化石组成的化石层同时代的火山活动喷出气体的成分和含量有明显差别(表 2、表 3 和图 2), 由此推断, 本区不同生态环境的动物群死亡的机理不同:

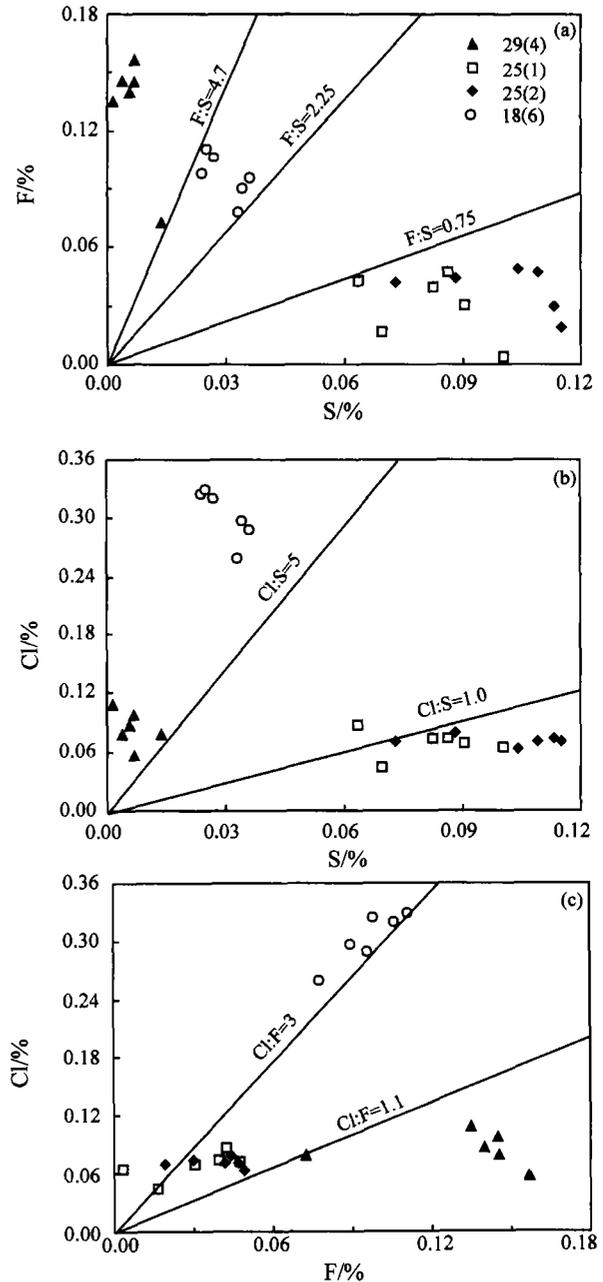


图 2 火山喷出气体之间的变异图解

(1) 与孔子鸟化石群(即 29(4)化石层, 图 1)同时期的火山喷发喷出的火山气体以 HF 为主(表 2), 其主要的环境效应是形成大规模有毒的火山灰云, 它们遮蔽天日, 在盆地内迅速蔓延, 最终造成鸟群

窒息而大批死亡。

(2) 化石层 25(1)和 25(2)均以长毛的恐龙化石为主(图 1 和表 3), 其对应的火山活动喷入大气圈的气体以硫化物成分(H_2S , SO_2 等)占优势(表 2、图 2(a)和 2(b)), 这些气体会形成火山成因的硫酸气溶胶和酸雨, 其综合气候效应是导致地表温度迅速降低和造成陆地爬行动物的皮肤遭受酸雨的腐蚀和侵袭, 最终引起区域性气候、环境的明显改变, 由于新的环境不适应这些恐龙生存而导致它们大批突发性死亡。

(3) 化石层 18(6)含有龟鳖类、鸚鵡嘴龙和翼龙类等多类脊椎动物化石(图 1), 同时期火山喷出的气体以氯化物为主(图 2(b), 2(c)和表 3)。野外观察表明, 此次火山喷发的规模最大, 火山喷发物总量也最大, 依据估算火山气体总量的岩石学模式^[16,17], 获得此次火山喷发喷出的 HCl 和 Cl_2 气体的总量也最大, 因此认为这次大规模火山喷发导致了辽西局部地区大气圈臭氧浓度明显降低, 甚至破坏大气臭氧层, 以致形成“臭氧洞”, 从而对当时生物界的各类生物均产生了毁灭性打击, 最终形成 18(6)层内不同种类的脊椎动物化石共存在一起的现象。

表 3 火山喷出气体的组成特征与脊椎动物化石组合的对应关系

样号	F/S*	Cl/S*	Cl/F*	火山喷出气体的含量	脊椎动物化石组合
29(4)	>4.7	>5	<1.1	以 HF 为主, HCl 较低, SO_2 最低	孔子鸟化石占绝对优势
25(1)和 25(2)	<0.75	<1	1.1~3	硫化物气体较高, HF 和 HCl 含量相当, 但均较低	以长毛的小型兽脚类恐龙化石为主
18(6)	2.25~4.7	>5	>3	HCl 含量最高, HF 次之, 硫化物气体最低	含多类脊椎动物化石

* 数值来自图 2

6 脊椎动物快速辐射的证据及其与火山活动的内在联系

在四合屯发掘剖面上, 迄今在仅仅 7 m 厚的中生代玛珥湖相沉积物内^[26], 除发现上述 4 次大规模的脊椎动物集群死亡形成的化石层外, 还确认出其他 8 个较大规模脊椎动物化石层。在这不是很长的时限(据玛珥湖纹层平均沉积速率初步估算, 7 m 厚湖相沉积物的持续时间小于 20 万年)内^[1], 发生了至少十余次大规模脊椎动物集群死亡事件。据不

完全统计, 在这期间共出露千余件脊椎动物化石以及数以万计的各类无脊椎动物化石, 并且这些脊椎动物化石组合具有原始性和进步性双重特征^[2]。说明在这一时期热河生物群的脊椎动物呈现出多次快速辐射的特征。

现代活火山喷发的研究表明, 在火山喷发的间歇期, 某些火山喷发物对生物圈的影响是积极的^[8,18,27]。最明显的证据是, 许多第四纪时期以来的火山活动区现在均为土地肥沃的自然风景区(如欧洲的 Eifel 地区^[18]、美国的夏威夷和西部沿海地区^[18,21]以及我国的东北^[16,22]等地), 那里的环境优美, 植被茂盛, 并且适宜许多动物生长和繁殖。下面我们以辽西中生代火山喷发物(包括火山岩、火山灰、火山气体及其气溶胶)的成分、结构和含量(表 2、表 4 和图 2)为依据, 结合该区火山活动的脉动式喷发特点, 从火山活动对气候和环境影响的角度, 具体分析在辽西中生代火山活动的间歇期间内, 火山喷入到地表(包括大气圈、水圈和生物圈)的喷发物对本区脊椎动物快速复苏、辐射效应的影响。结果表明, 研究区频繁的中酸性火山喷发以如下方式促进了辽西地区的气候、环境在火山间歇期向着有利于生物界繁盛的方向发展, 从而加速了四合屯脊椎动物集群死亡后出现快速辐射演化:

(1) 如前所述, 在四合屯剖面中发现的数十层火山碎屑岩是中酸性岩浆房多次脉动式喷发的结果, 每次喷出的液态熔浆的主要元素成分差别不大(表 4)。其共同的特点是, 火山喷出的碎屑岩中土壤有效微量元素(指对植物有效或能为植物吸收利用的土壤微量元素^[29])和植物生长过程中必需的一些营养元素^[29]含有较高, 包括 K, P, Fe, Mn, Ca, Mg, Cu, Zn, Mo 等。表 4 显示, 除 Fe 外, 火山喷发物中的其他营养组分均高于上地壳的平均含量。并且, 由于本区火山喷发能量较大, 爆发指数较高(详见后述), 因此形成的火山碎屑破碎较强烈, 喷发物中细粒火山碎屑(即火山灰级的碎屑, 直径小于 2 mm)的比例普遍较高, 因此, 这些火山碎屑易于风化, 最终导致上述元素会高比例地进入周围介质。上述两方面的因素会导致在火山喷发后的一段时间内, 上述营养元素大量从火山碎屑岩中迁移滤出进入土壤系统, 它们会增加土壤中营养元素的含量, 改良土壤, 增强土壤肥力, 促进适宜生物生存土壤层的形成。

表4 含化石层的火山凝灰岩的化学成分

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	Zn	Cu	Mo
18(6)	61.86	0.53	14.61	5.66	0.16	2.34	3.51	4.04	6.58	0.71	98.53	84.52	53.56	3.65
18(6)	61.33	0.73	15.27	5.11	0.14	2.36	3.82	4.11	6.31	0.82	98.75	86.28	54.85	4.07
18(6)	62.01	0.58	14.88	5.24	0.15	2.17	3.75	4.23	6.39	0.60	99.02	78.54	50.21	3.86
25(2)	60.77	0.35	15.23	5.24	0.14	2.97	4.70	4.31	6.06	0.22	98.80	87.00	50.16	4.88
25(2)	60.28	0.42	15.63	4.75	0.36	3.28	4.49	4.42	5.72	0.65	98.67	85.57	51.96	4.49
25(2)	60.52	0.47	15.48	4.67	0.16	2.37	5.18	4.37	6.01	0.77	99.21	87.21	48.25	4.31
25(1)	58.92	0.68	15.62	5.69	0.11	3.27	4.79	4.28	5.82	0.82	99.10	94.71	65.83	5.43
25(1)	59.02	0.72	15.49	5.39	0.08	2.95	4.94	4.20	6.48	0.73	98.39	90.12	65.43	5.03
25(1)	58.58	0.52	15.72	5.82	0.17	3.42	5.10	4.11	6.03	0.53	99.48	96.52	61.84	4.72
29(4)	65.45	0.82	16.12	3.79	0.14	1.81	2.92	3.16	5.41	0.37	99.38	78.62	45.86	3.78
29(4)	66.86	0.40	15.26	4.62	0.16	1.76	2.71	3.77	4.12	0.33	99.87	76.27	47.96	4.42
29(4)	65.89	0.44	15.22	4.42	0.13	1.68	2.57	3.85	5.24	0.56	99.41	84.84	46.31	4.19
平均	61.79	0.55	15.38	5.03	0.16	2.53	4.04	4.07	5.85	0.59	99.05	85.85	53.52	4.40
上地壳*	62.80	1.00	18.90	6.5**	0.11	2.20	1.30	1.20	3.70	0.16	99.90	85.00	50.00	1.00

表中的主要氧化物均已换算成无水条件下的百分含量。Zn, Cu 和 Co 3 个元素的单位为 10⁻⁶

* 上地壳的成分据文献[28]

** 为 FeO 的含量

(2) 辽西中生代火山喷出气体的成分以酸性火山气体(如 SO₂, H₂S, HF, HCl 等)为主, 它们随火山喷发柱进入大气圈后会与火山喷出的大量水蒸汽(表2)以及大气圈中的水蒸汽发生光化学反应, 形成酸雨。它们沉降于地表, 首先可以导致地表形成微酸性环境, 这种环境有利于上述营养元素以络合物的形式进入周围介质, 从而促进火山碎屑岩中上述有益元素的淋滤作用; 其次, 以往研究表明, 微酸性介质环境会增强上述植物营养元素(即 K, P, Fe, Mn, Ca, Mg, Cu, Zn 和 Mo)在土壤中的有效性^[18, 29, 30], 因此辽西火山气体造成的地表微酸性环境可以提高土壤中上述主量和微量元素有效性和活动性, 最终提高土壤肥力、加速植物生长; 另外, 本区火山喷出气体也可以与地表岩石发生如下化学反应: $CaSiO_3 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + SiO_2$; $CaSiO_3 + SO_2 \longrightarrow CaSO_3 + SiO_2$; $CaSiO_3 + 2HCl \longrightarrow CaCl_2 + SiO_2 + H_2O$; $CaSiO_3 + 2HF \longrightarrow CaF_2 + SiO_2 + H_2O$, 从而加速地表岩石(包括火山岩、火山灰等)的化学风化以及成壤作用。

(3) 本区火山喷发以剧烈的爆发形式为主, 形成的火山喷发柱较高, 火山活动形成的大规模气溶胶, 它们与火山灰一起随喷发柱进入大气圈, 会增加大气圈中固相微核的密度, 从而促进大气圈中水蒸汽的凝聚作用, 最终造成降雨量增加; 同时, 雨量的增大会使大气圈的湿度加大, 导致气候向潮湿方向演变。上述这些由于火山作用导致的充沛降雨和形成的大面积肥沃的土壤等因素为火山喷发后

歇期内陆生植物的快速复苏、生长发育、进一步繁盛奠定了物质基础。植物的复苏和繁盛不仅可以改善区域性的大气组成, 而且为植食性动物的复苏和发展创造了有利条件; 同时也为各种由低到高等的动植物的生物链建立提供了物质前提。另外, 火山喷发物中上述这些土壤营养元素和组分(即 K, P, Fe, Mn, Ca, Mg, Cu, Zn, Mo 等)在被淋滤出后, 会通过外动力地质作用, 将它们带入河流和湖泊中, 从而促进湖中动植物的生长发育; 同时, 直接沉降于湖水中的大量火山灰及火山尘级的细粒火山碎屑, 由于颗粒与周围介质的接触面积较大, 会直接为水体中的低等生物提供丰富的矿物质元素, 促进其生长发育。

(4) 本区大规模火山喷发在当时会形成巨型层状火山锥和破火山口(如黑蹄子沟火山机构等), 因此出现火山锥不同高度气候的垂直分带, 这有利于植物和动物群落的垂向分带的形成, 会形成一种新的生态平衡和多类生物共存的自然景观, 从而也为生物的快速复苏和繁盛提供了更广阔的三维空间。

(5) 研究表明, 大规模中酸性火山活动喷出的流体可达超音速, 其巨大的喷发能量能够在周围地区产生强烈的超声波^[18]。辽西地区强烈的火山喷发是剧烈构造运动的反应, 同时还可能伴随有地震发生; 而且, 更重要的是, 本区的火山喷发能破坏当时的大气臭氧层(详见前述), 导致附近生物接受过量紫外线的辐射; 另外, 野外和室内显微岩相学的研究表明, 四合屯发掘剖面中含化石的火山岩夹层

内火山碎屑岩平均高达95%左右,说明本区火山爆发的强度和能量均很大,推断伴随火山爆发,在周围地区会产生大规模超声波.所有上述这些与火山活动有关的因素(如强烈地壳运动、地震活动、超声波影响和过量紫外线的辐射)均有利于诱发甚至导致生物基因突变,从而加速变异甚至新种的产生,因此在辽西每次火山爆发后会快速呈现多类生物复苏、繁盛的景象.

(6) 四合屯中生代玛珥湖及其古气候研究显示,许多火山凝灰岩层中含有炭屑层^[26].表明本区火山喷发曾造成大规模火灾,大火将周围地区大面积植被(森林和/或草原)烧毁,同时在当时的地表残留了很厚的草木灰.现代土壤肥料学研究表明,草木灰中含有许多对植物有益的元素(如N, P, K, C等),它们是增加土地肥力、加速植物生长和促进植被茂盛的极好的自然肥料^[29,30].因此,可以认为,辽西中生代火山喷发引起的大规模火灾对当时的植物界和生物链给予了毁灭性打击,同时又为紧随其后出现在火山喷发间歇期内的生物快速复苏和繁盛提供了有利条件.

(7) 如上所述,辽西大规模火山喷发造成了大批脊椎动物集群死亡,这些死亡动物的软体腐烂后会形成自然肥料,它们为增进土地的肥力和促进后来生物的生长发育提供了物质条件.另外,在中生代,四合屯地区处在地势低洼的盆地内部,盆地的边缘是地形较高的分水岭^[25],这使火山喷出的大量水(表2)和其他对生物生长有益的营养组分不易流失,有利于保持土壤肥力.这些条件对促进生物复苏也是十分有利的.应当指出,本区脊椎动物在火山喷发间歇期出现的快速辐射特点是由生物演化历程中的内因和外因两方面因素共同决定的.内因是生物遗传和变异的矛盾;外因是指生物生存的外界环境,包括火山活动、古气候变化和地球磁场改变等.上述研究表明,频繁的、脉动式的火山活动是促使热河生物群中脊椎动物多次快速辐射的重要外界条件.

7 讨论

7.1 脊椎动物死亡后快速埋藏的证据

下面的特征表明,辽西地区的脊椎动物化石层属于脊椎动物集群死亡后被快速埋藏的结果,它们没有经过长时间、长距离的搬运作用:

(1) 一些脊椎动物化石按解剖学位置保存的十

分完整、精美.如采自辽宁凌源的刘氏白鲟化石,保存极其精美,其尾鳍、鳞片等微细特征清晰可见^[3].说明该动物死亡后没有经过长时间、长距离的搬运而迅速被埋藏起来,否则动物的肢体尤其微细特征可能会受到破坏.

(2) 辽西地区发现了一些难以保存下来的脊椎动物化石.例如,滑体两栖动物的骨骼非常细弱,而且这类动物大多生活在温暖潮湿的环境中,一旦死亡,其尸体和骨骼会很快腐烂,很难保存成为化石.然而,近年来,在辽西及其邻区发现了大量保存十分精美的滑体两栖动物化石,包括三燕丽蟾、葛氏辽蟾、钟健辽西蟾、东方塘蟾和奇异热河蟾等^[3].这些保存完好的化石说明它们是动物死亡后尸体腐烂前被快速埋藏的结果.

(3) 我们知道,鸟类大部分时间在空中飞翔,因此与其他动物相比,鸟类保存为化石的机会较少.正因为如此,在第一块始祖鸟标本发现后的140年中,人们也仅发现了始祖鸟的7件骨骼和1件羽毛标本.但是,据不完全统计,在中国辽西四合屯附近至今已发现保存完好的孔子鸟等早期鸟类化石近千件^[2],这些化石常富集保存,并且化石间相距非常近.如此大量的鸟化石,说明它们是鸟类死亡后快速埋藏的结果.

(4) 在辽西地区,除骨骼等硬体部分完整保存外,相当多的化石还完整地保存了羽毛(例如,孔子鸟、长城鸟、辽宁鸟和始反鸟),羽状或“羽毛状”皮肤衍生物(例如,长毛的小型兽脚类恐龙)和皮肤印痕(例如,鸚鵡嘴龙和满洲鳄^[3])等.另外,很多恐龙化石保存胃脏残余物(即“最后的晚餐!”)和其他生理组织^[1].而且,一些哺乳动物还保存了很好的毛发.所有这些特征都暗示了动物死亡后被快速埋藏的过程.

7.2 火山灰和火山气体在脊椎动物化石层形成过程中的功能分析

对发掘剖面的详细研究表明,所有的化石层都出露在火山凝灰岩中.当化石层赋存的火山凝灰岩所代表的火山喷发喷出的火山灰和火山气体的含量都较高时(如29(4)层,图1和表2),相应的化石层内脊椎动物化石的数量较多、密度较大,而且化石保存十分完整;当化石层赋存的火山凝灰岩所指示的火山喷发喷出的气体含量较高,而火山灰的含量较低时(如18(6)层,图1和表2),相应的化石层内的脊椎动物化石尽管种类较多,但其数量较少;当

化石层赋存的火山凝灰岩所代表的喷发喷出的火山灰含量较高,而火山气体的含量相对较低^[4]时,相应的化石层内的化石种类和数量往往均较少(如24(1)层)^[1,5],但化石保存较完整。野外和显微镜观察显示,火山灰含量高的层位,化石保存得均较完整(如29(4)层);而火山灰含量较低的层位,脊椎动物化石保存得相对差些(如18(6)层)。上述特征说明,火山喷出有毒气体的主要作用是导致脊椎动物集群死亡,而火山灰除了与火山气体一起造成动物大批死亡外,其最主要的功能是在脊椎动物死亡后迅速埋葬和覆盖其尸体,使尸体不至于被氧化、腐烂而保存为完整的化石。

7.3 辽西中生代火山活动对其附近生物界影响的综合效应

由上述可知,在热河生物群生存时期,辽西地区发生了大规模火山活动,它们喷出的气体含量高于世界上相同成分的其他活火山喷出的气体含量(表2)。火山喷发造成辽西及其邻区的古气候和古环境出现了快速的、大幅度的变化,即火山活动是当时辽西地区气候变化的主要驱动因子之一。火山喷发对辽西地区生物界的影响是双重的。一方面,在火山活动期间,由于它能够突然释放出巨大的能量,同时喷出了大量有毒、有害的火山气体和火山灰,它们遮天蔽日、形成酸雨、引起地表降温甚至破坏臭氧层等,这种突发性地生物界劫难会立刻造成附近生物集群死亡,随后沉降下来的火山灰快速将动物尸体覆盖、密封起来,完整地保存,使其不被氧化,最终形成完好的脊椎动物化石层。另一方面,在剧烈的火山活动期结束后,辽西地区进入了火山喷发间歇期,在此期间,由于火山喷发物较长期的风化、分解、元素淋滤等作用会促进/导致土地肥沃,植物茂盛,随后动物大量生长,进而逐步建立适合于新的气候、环境条件的生物链,形成生物的快速辐射效应,甚至达到兴旺鼎盛时期。由于本区火山活动具有多期脉动喷发的特点,在间歇期之后的下一期突发性火山活动,同样又会造成这些在火山间歇期快速繁盛起来的脊椎动物大批死亡,如此循环往复。因此,可以认为,正是由于中生代频繁的、脉动式的大规模中酸性火山活动造就了在火山活动的间歇期辽西地区出现了适宜生物生长、繁殖的气候环境,促进了各类生物的快速复苏、辐射和异常繁盛,同时大规模的火山喷发又在地史的“瞬间”将这一生物界的繁荣景象毁灭、随后埋葬

并保存为化石。所以说,辽西中生代火山活动在形成了四合屯发掘剖面中见到的数十层火山凝灰岩的同时,也导致了剖面中的十余个保存完好的、大规模的脊椎动物化石层和其他位于凝灰岩中的许多脊椎动物化石的形成。由此看来,在火山活动期间,辽西中生代火山喷发主要的作用是导致周围地区大批脊椎动物集群死亡;而在后来的喷发间歇期,它的作用是促进生物界复苏和快速辐射,形成本区生物界“短暂”的繁荣景象。

8 结论

辽西四合屯发掘剖面中火山凝灰岩层所指示的火山喷发具如下特征:

(1)多期次、高频率、脉动式喷发,岩浆成分以中酸性为主。

(2)火山喷发的能量大、爆发性强。

(3)火山喷出气体以酸性气体成分为主,其含量较高,不同种类的脊椎动物化石对应的火山气体组成存在着差异。

(4)火山喷发物中土壤营养元素的含量较高,并且容易被淋滤出来,进入土壤系统。

(5)火山喷发物中火山灰级的碎屑含量较高。

上述特征表明,辽西地区的火山活动能够造成脊椎动物大批死亡,随后将尸体覆盖、完整保存下来;并且在喷发后的间歇期促进了脊椎动物的快速复苏和辐射,最终形成存在于火山碎屑岩中的脊椎动物化石层。

致谢 样品挑选、处理和测试工作得到德国 Kiel 大学 Schmincke 教授、比利时 KUL 大学 Hertogen 教授、Mareels 和 Romain 博士的帮助和指导。成文过程中曾与赵国春、储国强博士进行过有益的讨论。汉景泰研究员仔细审阅全文,并提出建设性修改建议,作者表示感谢。

参 考 文 献

- 汪筱林,等. 辽西北票四合屯脊椎动物化石组合及其地质背景. 见:陈丕基,金帆主编. 热河生物群(第11号). 合肥:中国科技大学出版社,1999. 310~327
- 汪筱林,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
- 张弥曼. 热河生物群. 上海:上海科学技术出版社,2001. 1~131
- 郭正府,等. 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. 中国科学, D 辑, 2003, 33(1): 59

- 5 汪筱林, 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
- 6 Swisher C C, et al. Cretaceous age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. Nature, 1999, 400: 58
- 7 王思恩. 热河生物群的起源、演化与机制. 地质学报, 1990, (4): 350
- 8 王思恩. 热河生物群的古生态与古环境. 地质学报, 1999, 73 (4): 289
- 9 邓晋福, 等. 岩浆作用、深部壳幔过程与资源-环境效应. 地质论评, 1999, 45(增刊): 21
- 10 陈丕基. 热河生物群的分布与迁移. 古生物学报, 1988, 27 (6): 659
- 11 陈丕基. 热河生物群的分布与扩展. 见: 陈丕基, 金帆主编. 热河生物群(第11号). 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. 1~6
- 12 邓晋福, 等. 中国大陆根-柱构造. 北京: 地质出版社, 1996. 34~39
- 13 汪筱林, 等. 辽宁西部义县组翼手龙科化石的发现. 科学通报, 2001, 46(3): 230
- 14 侯连海. 最小的早期鸟类-娇小辽西鸟. 科学通报, 1999, 44 (3): 311
- 15 Devine J D, et al. Comparison of microanalytical methods for estimating H₂O contents of silicic volcanic glasses. American Mineralogist, 1995, 80: 319
- 16 Horn S, et al. Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD. Bull Volcanol, 2000, 61: 537
- 17 郭正府, 等. 火山气体的成分和总量研究. 地学前缘, 2002, 9 (2): 359
- 18 Sigurdsson H. Encyclopedia of Volcanoes. New York: Academic Press, 2000. 1~1384
- 19 Devine J D, et al. Estimates of sulfur and chlorine yield to the atmosphere from volcanic eruptions and potential climatic effects. Journal of Geophysical Research, 1984, 89 (B4): 6309
- 20 McCormick M P, et al. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. Nature, 1995, 373: 399
- 21 Beget J E, et al. Climatic impact of explosive volcanism. PAGES News Letter, 1996, 3: 15
- 22 郭正府, 等. 火山活动与气候变化研究进展. 地球科学进展, 2002, 17(17): 595
- 23 Brasseur G, et al. Mount Pinatubo aerosols, chlorofluorocarbons and ozone depletion. Science, 1992, 257: 1239
- 24 Rampino M R, et al. Volcanic winters. Annual Review of Earth and Planetary Science, 1988, 16: 73
- 25 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989. 323~393
- 26 Liu J, et al. Fossil-rich Early Cretaceous maars in Liaoxi, North-east China. Terra Nostra, 2000, 6: 274
- 27 李兆薰. 爆发性火山作用及其对生命支持系统的影响. 地学前缘, 1998, 5(3): 87
- 28 Taylor S R, et al. The Continental crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell Scientific Press, 1985. 28~29
- 29 杨忠芳, 等. 现代环境地球化学. 北京: 地质出版社, 1999. 206~420
- 30 陈忠焕. 土壤肥科学. 北京: 中国农业出版社, 1999. 1~213



国家自然科学基金研究专著

《机械系统的振动同步与控制同步》闻邦椿等 编著

科学出版社 定价: 30.00 元

本书是在完成“关于机械系统控制同步理论及其应用的研究”、“多机机械系统广义同步与定速比传动智能控制的理论及其应用的研究”等国家自然科学基金委员会资助项目及其他相关科研项目的基础上撰写的一部专著。书中以机械系统的非线性动力学理论和现代控制理论及智能控制理论为基础,研究了双机或多机机械系统的振动同步、控制同步和复合同步,机械系统定速比控制问题以及多液压缸系统的控制同步问题。书中较详细地研究了实现振动同步、控制同步和复合同步的基本理论、基本方法及具体措施,介绍了作者长期从事这一课题研究的工程实践经验,在讲述理论与方法的过程中,列举了若干工程应用实例。

本书可供大专院校师生阅读与参考,还可供从事机械工程、控制工程、动力学研究与设计的科技人员参考。