

全球 12000 a BP 以来火山爆发记录 及对气候变化影响的评估*

于 革 刘 健

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京210008)

提 要 全新世气候变化的动力成因, 至今未有定论. 大量地质证据揭示了全新世气候多次降温, 并反映出与火山爆发有时间对应关系. 现代气候观测证明了火山灰进入平流层滞留后随环流扩散成为太阳辐射的屏障层, 从而导致地表降温. 停留在地质火山爆发和全新世气候在逐点遥相关研究上, 难以从宏观机制上加以认识. 本文试图对地质火山影响古气候变化的定性推论与现代火山气候效应这两个环节, 给予动力机制上的联系和分析. 通过火山地质记录的现代气候效应类比, 对地质火山数据进行集成, 所反映的五次全新世强火山爆发集中期与地质记录的寒冷期/降温期/新冰期能够对应. 对火山爆发集中期和平静期两种气候状况, 通过三维大气环流模式进行气候数值模拟, 评估火山灰产生的不同区域的降温效应. 模拟结果表明, 火山灰阳伞效应造成北半球年平均温度普遍降低, 且具有明显的区域差异. 高纬度降温幅度大于低纬度, 夏季降温幅度大于冬季. 全新世火山影响气候时空记录和火山灰敏感性气候试验为进一步探讨全新世气候变化成因提供重要的科学依据, 也为最终认识现代气候系统变化以及对未来十年-百年尺度的气候预测提供重要的参照系.

关键词 火山地质 火山爆发期 火山灰敏感性试验 气候效应 全新世
分类号 P467

全新世气候变化的幅度、周期以及动力机制, 与晚第四纪万年尺度的冰期-间冰期旋回不尽相同, 难以用地球轨道参数变化来解释^[1]. 大量地质证据反映了全新世气候降温, 并认为与火山爆发有密切关系, 因而一些科学家提出了火山爆发可能是导致全新世新冰期的主要原因之一^[2]. 火山灰和火山气体由于改变大气成分、参与大气环流、影响进入大气太阳能, 从而对气候变化产生深远的影响. 随着对全球现代气候的观测和研究, 证明了火山灰进入平流层滞留后随环流扩散成为太阳辐射的屏障层, 从而导致地表降温, 因而火山活动被认为是气候变冷的原因之一^[3]. 目前国内外研究者从大量的历史证据对百年至千年的火山爆发记录作了许多系统的研究^[4, 5], 但对全新世的千年至万年的火山记录主要集中于对单个火山地质以及气候效应研究. 由于缺乏对时间序列和空间分布等过程和规律性研究, 难以设定大气成分等边界条件进行气候模拟研究, 因而难以从物理机制上深入探讨, 全新世多次冷期成因停留在假说阶段. 解决这个问题需要地质学与气候学的相互渗透, 近代气候模拟技术与古代火山地质系统资料的相互结合.

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-SW-118, KZCX2-108) 和中国科学院南京地理与湖泊研究所创新项目(CXNIGLAS-A02-06)联合资助. 2002-04-13 收稿, 2002-05-29 收修修改稿. 于 革, 女, 1957 年生, 博士, 研究员.

与现代火山爆发的仪器检测不同, 地质时期火山爆发只能采用保留在地表的火山地质体恢复火山爆发规模, 间接分析它对大气成分、大气环流状况以及物理效应产生的气候效应. 火山柱高度是估计地质时期火山爆发对气候影响时空范围的一个重要参数, 需要通过火山地质的重建和模拟, 例如冈底斯新生代火山研究证明火山柱达到平流层顶部^[6, 7]. 作为用于气候模拟的边界强迫来探讨长期气候变化, 全新世火山活动变化特征、过程以及时空分布依赖于一个全球尺度的数据的系统集成.

本文从一万多年来的全球火山爆发记录, 根据现代火山的气候效应类比评估地质火山活动规模, 并采用火山爆发影响平流层以及对大气光学物理性质的改变进行数值模拟, 测试火山爆发集中时期的气候效应, 从而为气候模拟的边界强迫提供时空分布基础资料, 为深入探讨和分析气候变化动力机制提供科学依据.

1 资料及其分析方法

从火山地质和火山学的角度, 采用0到8级火山爆发指数(Volcano Explosivity Index, 缩写 VEI)^[8] 定量评估火山活动规模以及对气候的影响. VEI 数值从小到大代表着火山爆发强度、范围、能量释放以及对周围的破坏程度由弱到强(表 1). 地质火山的定量评估也采用 VEI 来度量^[9]. 尽管表 1 中火山发生频率、爆发景观等动态指标难以保留在火山地质体中, 但火山体积可以从火山地质地貌形态来估算, 从而用来判定 VEI. 火山爆发类型主要决定于岩浆成分. 基性岩浆以宁静式夏威夷型喷发为主, 中、基性岩浆以介于宁静-爆裂之间的斯特龙博利型为主, 酸性岩浆以爆烈式武尔卡诺型/普里尼型为主^[9]. 因此火山熔岩、火山碎屑物能够间接判断地质火山的 VEI. 火山柱是火山气体和灰烬喷发达到的高度但火山柱爆发后短到几小时、长到几天或几个月、几年就消失已尽, 难以在地质记录中留下踪迹. 不过这些难以被地质体保留的火山爆发高度与火山构造有一定的内在关系. 火山锥的相对高度愈高、火山口或破火山口的口径愈大、火山及其火山物质范围愈远, 一般情况下火山柱愈高. 因而古火山的 VEI 主要由保留的火山地质构造来判别. 例如, 火山锥的相对高度和火山平面分布范围以及火山灰分布的距离反映了火山爆发的强度和规模, 同时火山口的宽度或直径、破火山口的宽度或直径也能够度量火山爆发的规模. 大量近代火山构造和相应的火山 VEI 研究, 可以为古火山的 VEI 判定提供依据. 从世界近代火山数据库和美国国家地质数据中心获得的全球近代火山资料, 提取了具有观察到的火山爆发指数、同时具有相应的出现频率较高的火山地质数据(包括火山地貌数据和火山地质构岩性调查)共 37 个近代火山资料, 进行两者的关系统计(表 2), 作为对下文收集到的全新世火山 VEI 判识的依据. 由于 3 级 VEI 的火山柱高度在 3-15km, 能够达到大气平流层高度 10km 以上并参与大气循环, 本文对 VEI 小于 3 级的火山活动仅作为一级处理(即 0-2 级作为一级, 见表 2).

全新世活动火山 1500 余座, 火山爆发活动达到 8000 次^[9]. 作者根据全球火山名录^①统计, 在这些火山记录中, 759 座火山活动年代不详或无测年资料, 1000 年以来爆发的火

^①美国国家博物馆 Smithsonian 研究所《全球火山计划》.

山 630 余座, 1000 a BP 到晚更新世/早全新世 (10000-12000 a BP) 爆发的火山 124 座. 考虑到 1000 年以来的火山活动已经有比较系统的研究, 不在本文收集范围内. 因此, 根据国际上发表的火山地质研究报告, 这里对 100 多个全新世火山进行资料追踪. 此外, 对还没有收入到国际火山名录的中国全新世火山, 采用了刘嘉麒先生的综合研究^[6]. 结果发现, 尽管地质火山研究数量众多, 但同时具有火山构造形态测量和年代数据测定的火山活动记录只占到全部记录的 50% 左右. 由此, 本文收集了在 1000 aBP -12000 aBP 期间、同时具有构造定量和年代定年的火山 59 个、火山爆发记录 124 个. 这些火山主要参数和爆发年代列在表 3 中. 地质火山的 VEI 和火山柱高度采用上文与近代火山类比统计. 从定性方面而论, 由于地质火山的保存重力坍塌、地表侵蚀、以及后期火山活动的改造, 这样获得的古火山 VEI 与火山爆发的实际规模随着时间的增长有一定的差距. 因此将这个类比应用到气候模式中, 应该考虑一定的系数校正. 本文把早全新世及以前 (7000-12000 aBP) 每次爆发火山, 在现存的地质地貌估计的 VEI 基础上, 再增加一级, 作为对经过地表改造作用后恢复的 VEI 的一个追加量.

表1 火山爆发指数及其特征^{*}

Tab.1 Volcano Explosive Indexes(VEI) and characters

VEI	火山柱	体积	爆发类型	发生频率	爆发景观	典型火山
0	<100 m	1000s m ³	Hawaiian	数日	非爆炸	Kilauea火山
1	100-1000 m	10000s m ³	Haw/Strombolian	数日	和缓	Stromboli火山
2	1-5 km	1000000s m ³	Strom/Vulcanian	数星期	爆炸	Galeras火山, 1992年爆发
3	3-15 km	10000000s m ³	Vulcanian	数年	严重	Ruiz火山, 1985年爆发
4	10-25 km	100000000s m ³	Vulc/Plinian	10 ¹ 年	剧烈	Galunggung火山, 1982年爆发
5	>25 km	1 km ³	Plinian	10 ² 年	突然发作	St. Helens, 1981年爆发
6	>25 km	10s km ³	Plin/Ultra-Plinian	10 ² 年	巨大	Krakatau 火山, 1883年爆发
7	>25 km	100s km ³	Ultra-Plinian	10 ³ 年	超巨大	Tambora火山, 1815年爆发
8	>25 km	1,000s km ³	Ultra-Plinian	10 ⁴ 年	特超巨大	Yellowstone火山, 2Ma 内爆

* 非爆炸 (non-explosive); 和缓 (gentle); 爆炸 (explosive); 严重 (severe); 剧烈 (cataclysmic); 突然发作 (paroxysmal); 巨大 (colossal); 超巨大 (super-colossal); 特超巨大 (mega-colossal).

表2 近代火山地质与火山爆发指数统计

Tab.2 Geological statistics of recent volcano explosives and VEI

火山体范围(km ²)	火山高度(m)	火山灰范围(km)	破火山口直径/宽度(km)	火山口直径/宽度(km)	火山熔岩、碎屑	VEI估计
< 10	< 50				基性	2 以下
< 100	< 200		< 5	< 1	中-基性	3
< 200	200 -1000	< 10	5 -10	1 - 5 *	中-酸性	4
200 - 500	200 - 1000	10 - 20	10 -20	1 - 5 *	酸性	5
> 500	> 1000	> 20	> 20	> 5	酸性	6 以上

表 3 本文收集的 12000-1000 a BP 火山记录一览 (据文献 [2, 6, 9] 和 a, b 资料编制)

Tab.3 Statistics of relevant volcano records during 12000-1000 aBP

编号	火山名称	国家、 地区/海区	纬度 (N+/S-)	经度 (E+/W-)	海拔 (m)	火山类型	火山爆发 年代 (a BP)
1	长白山	中国	42	128.05	2743	破火山口	1070-1489, 2024, 2420, 4105
2	牡丹峰	中国	44.2	128.05	980	锅状火山口	5140
3	Lascar	智利	-23.37	-67.73	5592	层状火山	9000
4	Llaima	智利	-38.692	-71.729	3125	层状火山	7200
5	Hudson	智利	-45.9	-72.97	1905	层状火山	3600, 6700
6	Fournaise	印度洋	-21.229	55.713	2631	盾状火山	5000
7	Marion Island	印度洋	-46.9	37.75	1230	盾状火山	4020
8	Karkar	印度尼西亚	-4.649	145.964	1839	层状火山	1500, 9000
9	Long Island	印度尼西亚	-5.358	147.12	1280	复合型火山	4000
10	Galunggung	印度尼西亚	-7.25	108.05	2168	层状火山	4200
11	Campi Flegrei (Etna)	意大利	37.734	15.004	3350	层状火山	3700, 4600, 8000- 10500, 12000
12	Vulcano	意大利	38.404	14.962	500	层状火山	2100
13	Whale Island	新西兰	-37.858	176.98	348	复合型火山	9000
14	Harohato	新西兰	-38.12	176.5	1100	复合型火山	2050, 2450, 2850, 5050, 7050
15	Taupo (Tongari- tro)	新西兰	-38.82	176	760	破火山口	2500
16	Soufriere Guade- loupe	西印度群岛	16.05	-61.67	1467	层状火山	3100, 11500
17	Micotrin	西印度群岛	15.33	-61.33	1387	熔岩穹隆	10000
18	Acatenango	危地马拉	14.501	-90.876	3976	层状火山	2000
19	Fuego	危地马拉	14.473	-90.88	3763	层状火山	8500
20	Pago	太平洋	-5.58	150.52	742	破火山口	1200, 3300, 5600
21	Hargy	太平洋	-5.33	151.1	1148	层状火山	1000, 7000, 11000
22	Rabaul	太平洋	-4.271	152.203	688	火山碎屑盾	1400, 3500
23	Tanga	太平洋	-3.49	153.21	472	破火山口	2300
24	Loloru	太平洋	-6.52	155.62	1887	火山碎屑盾	3000
25	Ambrym	太平洋	-16.25	168.12	1334	火山碎屑盾	1900
26	Fuji	日本	35.35	138.73	3776	层状火山	2000, 2500, 3000, 4500-8000, 8500- 11000
27	Kikai	日本	30.78	130.28	717	破火山口	6300
28	Unzen	日本	32.75	130.3	1500	复合型火山	4000
29	Hakone	日本	35.22	139.02	1438	复合型火山	3000
30	Niigata-Yake- yama	日本	36.92	138.03	2400	熔岩穹隆	3000, 3500

续表3

31	Asama	日本	36.4	138.53	2560	复合型火山	11000-12000
32	Nasu	日本	37.12	139.97	1917	层状火山	5000
33	Bandai	日本	37.6	140.08	1819	层状火山	5000
34	Miyake-jima	日本	34.08	139.53	815	层状火山	3000
35	Usu	日本	42.53	140.83	731	层状火山	7000, 7500, 8000
36	Popocatepetl	墨西哥	19.023	-98.622	5426	层状火山	1200, 3800, 4000, 5000, 10000, 10500
37	Misti, El	秘鲁	-16.294	-71.409	5822	层状火山	2000
38	Okmok	美国	53.42	-168.13	1073	盾状火山	2400, 8250
39	Veniaminof	美国	56.17	-159.38	2507	层状火山	3700
40	Hood	美国	45.374	-	3426	层状火山	1800
41	South Sister	美国	44.1	-121.77	3157	复合型火山	2000
42	Medicine Lake	美国	41.58	-121.57	2412	盾状火山	6000, 10500
43	Lassen Volc Center	美国	40.492	-	3187	层状火山	1100
44	Clear Lake	美国	38.97	-122.77	1439	火山溢流	10000
45	Loihi	美国	18.92	-155.27	-975	海底火山	10000
46	Mauna Loa	美国	19.475	-	4170	盾状火山	4000
47	Mehetia	美国	-17.87	-148.07	435	层状火山	2000
48	Cameroon Mt.	喀麦隆	4.203	9.17	4095	层状火山	2500
49	Ardoukoba	红海	11.58	42.47	298	火山裂隙通道	5300
50	Azufra	哥伦比亚	1.08	-77.68	4070	层状火山	1000, 3600
51	Bulusan	菲律宾	12.77	124.05	1565	层状火山	5000
52	Mendeleev	俄罗斯	43.98	145.7	887	层状火山	4200
53	Ushishur	俄罗斯	47.52	152.8	401	破火山口	9400
54	Avachinsky	俄罗斯	53.255	158.83	2741	层状火山	7000
55	Zhupanovsky	俄罗斯	53.59	159.147	2958	复合型火山	5000-7000
56	Karymsky	俄罗斯	54.05	159.43	1536	层状火山	2000, 7600, 7700
57	Kliuchevskoi	俄罗斯	56.057	160.638	4835	层状火山	3000, 7000
58	Agua de Pau	大西洋	37.77	-25.47	947	层状火山	5000
59	Krafla	冰岛	65.73	-16.78	650	破火山口	2000, 3800

^a 美国国家博物馆 Smithsonian 研究所《全球火山计划》; ^b 美国海洋大气局地学数据中心《火山数据库》.

2 全新世火山爆发时空特征

根据 124 个火山记录, 在 12000-1000 aBP 期间爆发的火山的地理分布以及每个火山 VEI 累积值如图 1 所示. 这些火山分布与现代环太平洋、地中海-红海、北大西洋-冰岛等火山强烈活动区域的分布基本一致, 反映了全新世火山与现代火山在构造体系上的继承性. 对于每个火山而言, VEI 累积值大于 40 有两个, 分别是日本的 Fuji 火山 (74) 和意大利 Etna 火山 (46). VEI 累积值大于 7 的火山可以反映全新世至少有两次爆发 (地质火山最大估计到 7). 这里 VEI 累积值在大于 7 的火山占总火山个数 34%, 占总 VEI 累积值 68% (20 个火山, 总 VEI 累积值达 369), 反映了 1/3 全新世火山具有多次爆发和爆发强度大的特征.

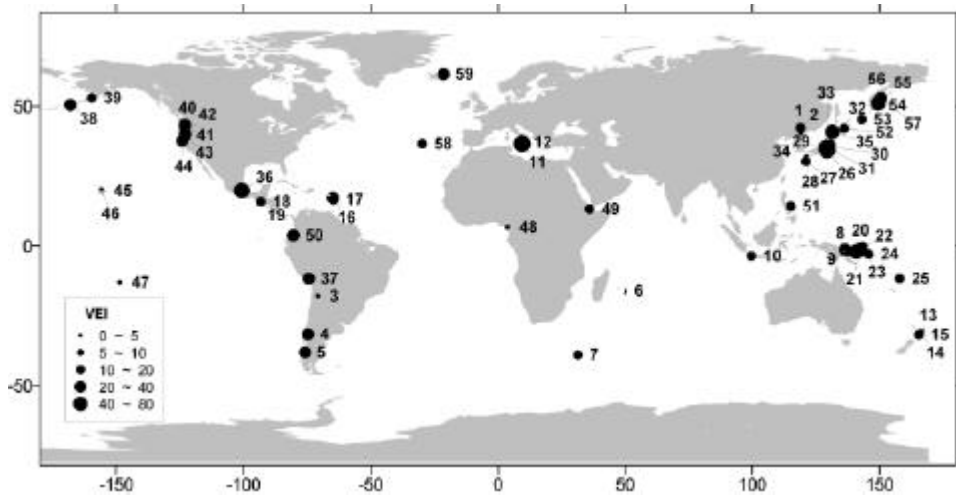


图 1 全球 12000-1000 aBP 期间火山地理分布以及每个火山 VEI 累积值. 火山编号见表3.
Fig. 3 Geographical distributions of Holocene volcanoes and the VEI sum of each volcano exploded during 12000-1000 aBP. Code of the volcanoes as Tab. 3.

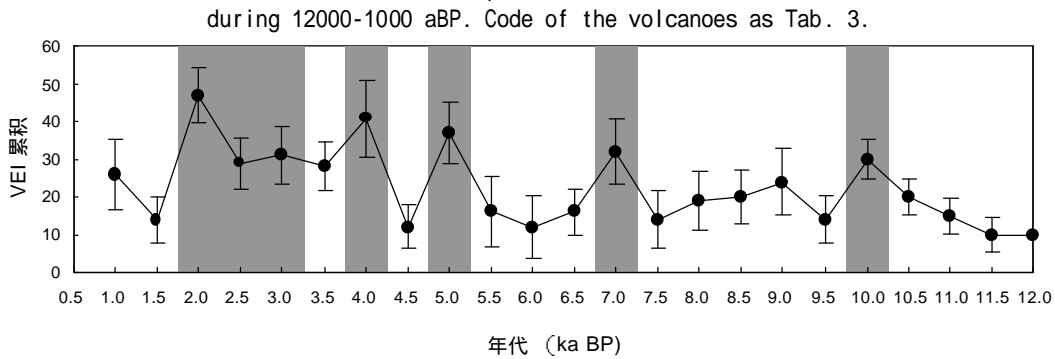


图 2 全球 12000-1000 a BP 期间火山 VEI 随时间变化 (以每 500 年的 VEI 累积值表示). 灰色区间是 VEI 累积值达到整体范围 60%以上, 代表火山爆发集中时期. 图中垂直为 VEI 累积值的误差估计, 范围采用每个时段总体标准偏差在95%的可信区间.

Fig. 2 Time sequence of Holocene volcanoes with a 500 yr-step of VEI sum. The grey columns are time slices on which VEI sum is higher than 60% of the total. Vertical lines are error bars computed at 95% confidence level.

图2给出了VEI 值在12000-1000 aBP 期间的变化序列, 以各个火山点每 500 年的 VEI 累积值表示. 500 年步长考虑到火山地貌、地质记录的精度和年代测定等误差范围. 这与冰芯或历史记录反映逐年至十年级尺度的精度不同, 500 年时间单位能够满足百年-千年尺度的全新世气候分析. 在11000 年中 21 个时间步长上, 每500 年累积值在 10-47 之间. 为了和已有的研究对比, 对这条曲线在2000-1000 aBP 期间进行逐年的累积, 其每年累积值在0-10之间. Robock 和 Free [4]通过冰芯资料对相当于¹⁴C年代 1950-950 aBP (0-1000 AD) 估计VEI 累积值在 0-10 之间, 与本文对2000-1000 aBP 的估计结果相当.

取 VEI 累积值 28.2 (整体范围 0-47 的 60% 处) 作为临界值, 把达到或超过这个值的时期作为火山频繁强烈活动的集中时期. 根据这个划分, 12000 aBP 以来全球有五次火山强烈活动集中时期 (图 2, 灰色区间), 分别在 10000±250 aBP, 7000±250 aBP, 5000±250 aBP, 4000±250 aBP 和 (3000-2000)±250 aBP.

全新世早期 (10250-9750 aBP) 是一个火山爆发集中时期, 火山爆发分布在北半球 10-38°N 一线. 火山爆发强度在 5 级以上、火山柱都达到 25km 以上. 从它们沿低纬环球带状分布特征来看, 火山爆发对气候影响巨大. 与在其它纬度爆发的火山相比, 这个纬度带上爆发的火山灰和气溶胶可达到全球, 扩散空间范围最大^[6]. 距今 7000 年前后是全新世第二个火山强烈爆发时期, 火山爆发主要在俄罗斯远东岛屿、日本、印度尼西亚、新西兰以及太平洋东岸智利南部, 分布在环太平洋火山带一线, 对太平洋地区具有较大的区域性气候影响. 全新世中期距今 5000 年前后, 在环太平洋火山带的西岸 (中国东北牡丹峰火山, 俄罗斯 Zhupanovsky、Avachinsky 火山, 日本 Fuji、Nasu、Bandai 火山, 菲律宾 Bulusan 火山等) 和太平洋东岸 (墨西哥 Popocatepetl 火山) 大量火山爆发. 此外, 在北大西洋和南印度洋也有火山爆发的记录. 在 4250-3750 a BP 期间, 火山爆发除了在中国长白山、俄罗斯远东岛屿、日本、印度尼西亚、新西兰、墨西哥等环太平洋火山带, 在太平洋中部 (夏威夷 Mauna Loa 火山) 和冰岛 (Krafla 火山) 也有强烈爆发记录. 全新世最后一个火山爆发集中时期在 3250-1750 a BP. 火山爆发在环太平洋火山带东部 (中国长白山、俄罗斯远东岛屿、日本、印度尼西亚、菲律宾、新西兰等) 和西部 (阿拉斯加、西亚图、墨西哥、西印度群岛、危地马拉、秘鲁)、南太平洋 (Loloru 火山、Ambrym 火山)、地中海火山带 (意大利 Vulcano 火山)、西非喀麦隆都有强烈爆发记录. 与前面四次火山集中期持续在 500 年内不同, 这个时期的火山爆发在三个 500 年内的 VEI 累积值都连续超过临界值, 反映了强烈火山活动持续时间长达 1500 年.

3 火山爆发对气候变化影响的评估

对火山爆发影响气候变化的评估有多种途径, 本文采用了三维大气环流模式 (AGCM+SSiB^[10]) 进行气候模拟试验. 刘健等^[11]曾讨论了火山活动改变影响气候的主要途径、火山灰在全球大气环流模式中的数值试验设计方案的科学理由, 本文对火山爆发相对集中和相对平静的两种气候典型状况进行气候模拟以及由此对气候产生的影响进行定量和区域分析、评估. 据火山记录, 1600-1850 AD 是火山活动频繁且强度较大的时期. 来自 GISP2 的冰芯资料估算的平流层光学厚度值^[12]和根据南北半球的共 14 个冰芯中火山灰记录估算的平均光学厚度值^[4]在 0.05-0.10 之间, 最大可达 0.25-0.40. 据此, 在气候敏感性模拟试验中, 把火山爆发集中时期的平流层火山灰光学厚度值设为 0.15, 作为试验一. 作为对比的控制试验, 是火山爆发相对平静时期, 平流层火山灰光学厚度值为 0, 作为试验二.

图 3a, b, c 分别是试验一和试验二全年、夏季和冬季平均气温在北半球的纬度平均分布, 反映了火山灰降温效应以及在不同纬度上的区域差异. 模拟结果反映了高纬度降温幅度大于低纬度, 夏季降温幅度大于冬季. 火山灰敏感性试验模拟的气温空间分布表明, 在火山爆发集中期欧亚大陆年平均温度普遍降低, 幅度达 0.2-0.6°C. 纬度越高, 降温幅度越大, 最大降温中心位于 65°N, 115°E 附近. 我国长江流域以北的广大地区普遍出现了 0.2°C 的降温. 夏季整个欧亚大陆也以降温为主, 但其主要降温中心位于欧亚大陆的中部和阿留申地区, 最大降温达 1.2°C. 我国大陆中、西部降温明显, 可达 0.3°C. 东南季风控制的地区 (如我国的华东、华南地区) 降水明显减少, 年平均减少幅度在 0.5-1.0 mm/d 之间, 西风和西南季风控制的广大地区降水几乎持平或略增, 最大年均增幅小于 0.5 mm/d.

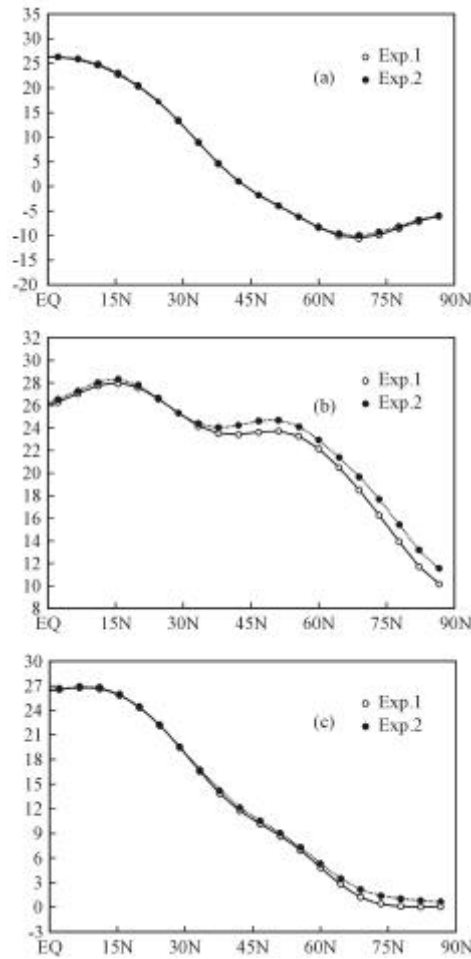


图3 试验1 (Exp.1) 和试验2 (Exp.2) 模拟的北半球气温的纬度平均分布(°C)
 (a)年平均; (b) 夏季平均; (c) 冬季平均
 Fig. 3 Simulations of latitude temperature means of the North Hemisphere by Exp.1 and Exp.2: annual (a), summer (b) and winter (c)

4 讨论和结语

冰川、深海和冰芯等大量沉积记录提供了全新世发生过多寒冷气候的证据。例如欧洲在8250、5350和2780 a BP发生冰川扩张,最早被称为全新世的新冰期^[13]。格陵兰冰芯揭示了在9300-8700、7700-6600、5200-4200、3000-1700 a BP四个时期的降温期^[14]。深海钻孔记录的8次寒冷期集中在10300、9400、8000、5400、4000、3000和1400 a BP^[15]。我国全新世气候出现过多次寒冷时期。王绍武和董光荣总结了来自冰芯、冰川雪线、黄土、湖泊、花粉、考古史料等大量的综合分析^[16],表明我国在11000-1000 a BP出现过多次气候冷期,主要集中在10900、10500、9700-9000、8500-7000、5000-5800、3500-4000、3000-2400和2000-1400 a BP。本文总结的五次火山集中时期,与这地质记录的寒冷期/降温期/新冰期能够部分对应。火山爆发集中时期与气候冷期的可比的时期主要在2000-3000 a BP前后、4000 a BP、5000 a BP和7000 a BP前后。这种对比仅仅是年代上可视对比,但至少可能暗示着火山爆发集中期与东亚降温具有某种因果联系。火山爆发集中期与全新世气候冷期并不是完全的一致,例如在8000 a BP和9000 a BP前后的气候冷期在目前火山记录中并不显著,全新世早期降温可能与第四纪冰流的急速融化以及海流温盐场变化关系密切^[1, 15]。全新世中后期的气候冷期变化,火山灰效应还可能与太阳辐射、和大气放射性碳变化等的参与产生的复杂的动力与反馈作用有关^[17]。这有待于通过具有物理机制的气候模式进行火山灰以及其它动力因子强迫气候场的模拟试验作深入探讨。

在AGCM中,平流层光学厚度通过硫化气溶胶的吸收和散射作用参与太阳辐射的改变,从而影响热力平衡以及大气动力作用。火山灰强迫气候场的模拟结果,反映了在火山爆发相对集中和相对平静的两种典型气候状况下温度和降水具有较大差异。火山爆发集中期的火山灰敏感性试验模拟了欧亚大陆年平均温度普遍降低,整个东亚地区普遍降温,幅度达0.2~1.2°C。纬度越高,降温幅度越大。火山灰产生的平流层光学厚度的增加,相当于小冰期火山爆发集中时期。小冰期被认为是全新世第四个新冰期^[13],与新冰期的气候特征有着很大的相似型。对这个时段的降温模拟能够得到历史证据和自然记录资料的验证^[11]。目前这里仅仅通过火山爆发强度改变的大气平流层光学厚度进行了敏感性气候模拟试验,以对比和认识火山爆发的气候效应。火山爆发柱的高度和分层、火山灰平面覆盖和扩散范围、不同纬度火山爆发的气候响应等,还取决于火山爆发的不同纬度的空间分布、各个火

、不同纬度火山爆发的气候响应等, 还取决于火山爆发的不同纬度的空间分布、各个火山点的爆发强度、高度等大量的火山地质资料集成。通过本文的火山地质资料以及气候效应的研究, 今后将对全新世气候变化的典型阶段进行进一步火山活动气候效应的模拟试验。

火山活动主要通过改变大气中的硫化物、CO₂和尘埃含量等方面来影响气候。从火山地质角度来看, 大气平流层光学厚度变化是火山灰影响大气的一个综合表现。国际上对千年来的火山灰影响大气, 大都通过这一指标进行估计。例如, Zielinski通过格罗兰冰芯钻孔(GISP2)中硫化物和尘埃等含量估算了过去2100年的平流层光学厚度值^[12], Robock和Free根据南北半球十多个冰芯中硫化物和尘埃, 把粒径在0.55 μm处的气溶胶光学厚度转化为冰芯火山指数并与气候变化对比^[4]。本文讨论的大气环流模式数值试验旨在评估地质时期(全新世12000-10000年)火山活动的气候形象。能够采用现代火山灰影响气候各种途径以应用到地质时期的模拟, 将能够极大的提高地质火山对古气候影响和作用方面驱动机制的全面认识。这项工作将是今后工作中努力的方向。

参 考 文 献

- 1 Rind D, Overpeck JT. Hypothesized causes of decade-to-century-scale climate variability: Climate model results. *Quaternary Science Reviews*, 1993, **12**:357-374
- 2 Simkin T, Siebert L, McClelland L, *et al.* Volcanoes of the World - A regional directory Gazetteer and Chronology of Volcanism during the last 10,000 years. Stroudsburg Pennsylvania: Hutchinson Ross Publishing Company, 1981:1-200
- 3 Francis P. Volcanoes—A Planetary perspective. New York: Oxford University Press, 1993: 1-443
- 4 Robock A, Free M. The volcanic record in ice cores for the past 2000 years. In: Jones P, Bradley R, Jouzel J eds. Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years. New York: Springer-Verlag, 1996: 533-546
- 5 张先恭, 张富国. 火山活动与我国旱涝、冷暖的关系. *气象学报*, 1985, **13** (2): 196-207
- 6 刘嘉麒. 中国火山. 北京: 科学出版, 1999. 145-177
- 7 郭正府. 火山喷发对地表温度影响研究——以冈底斯新生代火山喷发为例子. *地学工程进展*, 1997, **14** (3): 48-52
- 8 Newhall CG, Self S. The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of explosive magnitude for Historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**: 1231-1238
- 9 Simkin T, Siebert L. Volcanoes of the World (2nd ed) . Tucson: Geoscience Press, 1994: 1- 368
- 10 Wu G-X, Liu H, Zhao Y-C, *et al.* A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, **13**(1): 1-18
- 11 刘 健, 陈 星, 于 革等. 东亚小冰期气候形成中太阳辐射和火山灰作用的敏感性试验. *湖泊科学*, 2002, **14** (2): 97-105
- 12 Zielinski G A. Stratospheric loading and optical depth estimates of explosive volcanism over the last 2100 years derived from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**: 20937-20955
- 13 Denton GH, Karlen W. Holocene climate variations - Their pattern and possible cause. *Quaternary Research*, 1973, **3**: 155-205
- 14 O'Brien S R, Mayewski P A. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland Ice Core. *Science*, 1995, **270**(5244): 1962-1964
- 15 Bond G, Showers W, Cheseby M, *et al.* A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, **278**: 1257-1266
- 16 王绍武, 董光荣. 中国西部环境特征及其演变. 见: 秦大和主编. 中国西部环境演变评估(第一卷). 北京: 科学出版社, 2002. 39-46
- 17 Beer J, Mende W, Stettinmacher R. The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**: 403-415

Geological Records of Volcanic Explosions during the Last 12000 Years and the Volcanic Impacts on Climate Changes

YU Ge & LIU Jian

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract

It is difficult to fully recognize what the mechanisms are behind Holocene climate changes so far. Numerous geological evidences have suggested that several phases of temperature lowering occurred during the Holocene and the cold phases are correlated with events of volcano explosions. Modern observations in climatology have revealed that volcanic dust plays a role on the radiation blocking and leads to temperature lowering on the earth surface when the volcanic dust enter the stratospheric level. This paper is attempted to focus on both volcanic-climatology and volcanic-geology to understand volcano effects on climate changes, by an integration of geological volcano data and simulation of climate model. The compiling volcanic data show that there were five phases of strong volcanic explosions during 12000-1000 a BP. The volcano-tested climate simulations show that the annual mean temperature is generally decreased during the phase of the strong volcano explosions. Compared to phases of the weak- volcano explosion, the decrease in temperature varied from regions and from seasons. The amplitude of temperature lowering is bigger in high latitude than that in low latitude, and higher in winter than in summer. The results in volcano data set and climate simulations provided the data basis to further study the mechanisms of Holocene climate changes and the today-past analogues to finally predict changes in the future climate in the decade-century scales.

Keywords: Volcanic geology; phases of volcano explosion; volcanic-tested simulation; climate responses; Holocene