

吴帅男, 陈仕涛, 段福才. 北半球 72 ka BP 气候突变事件及其与 Toba 火山的关系[J]. 地球科学进展, 2012, 27(1): 35-41. [Wu Shuainan, Chen Shitao, Duan Fucai. The relation between the 72 ka BP Event and the Toba super-eruption[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(1): 35-41.]

北半球 72 ka BP 气候突变事件及其与 Toba 火山的关系*

吴帅男, 陈仕涛*, 段福才

(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046)

摘 要: 72 ka BP 左右的强降温事件是末次冰期最大的气候突变事件, 且同时期发生了第四纪以来最强的火山喷发——Toba 火山喷发, 后者在此次强降温事件中扮演着什么角色一直是古气候学界研究的热点。对此进行深入的研究, 有助于全面评价火山喷发的环境效应, 进一步完善末次冰期突变事件的成因机制。系统回顾深海岩芯、极地冰芯、洞穴石笋、黄土、湖泊等古气候载体的研究成果, 这些记录对 72 ka BP 左右的强降温事件和/或 Toba 火山喷发进行了不同程度的描述, 并从不同的角度分析二者的关系。从 72 ka BP 左右的强降温事件和 Toba 火山喷发的时间上, 以及火山喷发对气候变化影响的机理上看, Toba 火山喷发确实对这次强降温事件产生了实质性影响。这个影响在格陵兰冰芯记录中表现得尤为明显, 并得到了气候模拟的进一步支持。然而, 部分低纬海洋记录研究表明, Toba 火山喷发前后气候没有发生显著变化, 至少低纬地区的气候不如高纬地区变化明显。古生物研究同时显示出 Toba 火山喷发并未对其生存环境产生灾难性的影响, 由此可见, 72 ka BP 左右的强降温事件驱动机制及其对 Toba 火山喷发的响应程度尚存争议。今后的研究应重视提高气候记录分辨率和探测 Toba 火山喷发证据的研究, 从解剖事件的内部结构特征入手, 进而建立气候模式与火山效应之间的联系, 以此来明确“72 ka 事件”驱动机制及其对 Toba 火山喷发的响应关系。

关 键 词: 72 ka 事件; 成因机制; Toba 火山; 响应关系

中图分类号: P317.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2012)01-0035-07

1 引 言

末次冰期气候变化被一系列的千年尺度极端事件打断, 其中以发生在 72 ka BP 左右的降温事件最为突出。在格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中, 该事件结束时的温度变幅是整个 3 000 m 冰芯中最大的变幅之一^[1,2]。按 $0.67\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ 分馏系数^[3]计算, 其温度变幅达 10°C 左右, 和 YD 事件几乎差不多; 若按 $^{29}\text{N}_2/^{28}\text{N}_2$ 比率计算^[4], 其温度变幅可达 16°C 。东亚季风区葫芦洞石笋记录也显示在该事件期间 $\delta^{18}\text{O}$ 振荡

幅度均超过 2.5‰ ^[5], 比末次冰期以来的其他任何千年尺度事件都大。

然而, 这一事件之所以引起人们的关注, 并非因为其波动幅度大, 而是因为同期发生了第四纪历史上最强烈的火山喷发(Toba)^[6], 其产生的流纹质火山灰和火山渣总体积超过 800 km^3 , 覆盖了整个地球表面积的 1% ^[7,8]。该火山产生的 $100\sim 10\,000\text{ Mt}$ 的硫酸盐气溶胶颗粒进入了大气同温层^[8], 如此巨量的气溶胶, 再加上海冰扩张、SST 变化等各种反馈机制, 可能引起气候突变^[9]。因此, 72 ka BP 左右

* 收稿日期: 2011-05-06; 修回日期: 2011-11-22.

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“56 万年来神农架洞穴季风气候记录及其全球意义”(编号: 40631003); 国家自然科学基金项目“72 ka BP 左右强降温事件的年分辨率石笋记录及其驱动机制”(编号: 41072126)资助。

作者简介: 吴帅男(1988-), 女, 江苏启东人, 硕士研究生, 主要从事全球变化与区域响应研究。E-mail: wushuainan707@163.com

* 通讯作者: 陈仕涛(1974-), 男, 湖北襄樊人, 副教授, 主要从事全球变化与区域响应研究。E-mail: chenshitao@njnu.edu.cn

的降温事件自然就和 Toba 火山喷发存在一定的联系^[10,11],甚至被称为“Toba 事件”^[12]。然而,这次气候突变事件与 Toba 火山的关系尚处争论之中^[13],将其命名为 Toba 事件实属不妥。这里为了称谓方便,仿照“8 ka 事件”的命名原则——发生在 8 ka BP 左右全新世最大的降温事件简称为“8 ka 事件”^[14],称之为“72 ka 事件”。

2 72 ka BP 左右环境代用指标研究

位于印度尼西亚苏门答腊岛的 Toba 火山最近一次喷发与“72 ka 事件”之间的关系一直以来是讨论的热点问题,许多研究工作都是通过利用各种不同的古气候载体,如深海岩芯和极地冰芯和洞穴石笋等来探讨这一问题。

2.1 深海岩芯记录

在研究 Toba 火山喷发与气候的关系中,高分辨率海洋沉积记录扮演着重要的角色^[15],在海洋气候地层中所得到的火山玻璃碎屑沉积及其成分的鉴定是发现 Toba 火山喷发最直接的证据^[10,16],如在印度洋、阿拉伯海以及东海的钻孔岩芯中所发现的 Toba 火山灰沉积^[17~20]为研究工作提供了最直接的依据。早期研究发现,阿拉伯海钻孔岩芯记录的 Toba 火山灰层分布于 MIS4 和 MIS5a 界线附近^[21],说明 Toba 火山喷发在 MIS5a/4 转换时期,并且认为是 MIS4 冰期的起点,同时驱动了气候进入 MIS4 冰期^[9],甚至引起人类进化的分异^[23]。另外,海洋沉积序列拥有能够与极地冰芯记录进行直接对比的特点^[22],印度洋 136KL 和 111KL 2 孔磁化率曲线与格陵兰 GISP2 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线具有相似的高频变化特征,其 Toba 火山灰直接对应于 DO19 和 DO20 之间的冷谷^[10]。利用海洋岩芯中孢粉光谱分析所反映出的植被类型变化表明,Toba 火山喷发之后出现了一个明显的干旱时期,且持续时间至少有 1 000 a^[22]。

Williams 等^[22]在对孟加拉湾 SO188-342KL 岩芯沉积物的研究中发现,虽然印度及其周边地区在 Toba 火山喷发后有一段明显的干冷时期,但是由于海洋沉积物的沉降速率没有使其达到足够的厚度,进而很难确定植被的转换是火山喷发还是 DO 旋回过程中气候转变的结果,同时还指出其他有 Toba 火山灰的海洋沉积序列同样存在着分辨率相对较低的局限性^[24]。

2.2 极地冰芯记录

在格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中,“72 ka 事件”是指发生在 DO19 与 DO20 之间的千年冷事件^[1,2](图

1)。对“72 ka 事件”的精细研究来自 GISP2 冰芯,通过对高分辨率的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以及 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、电导率(Electric Conductivity Measurement, ECM)等多种指标的综合分析,揭示了该事件的振荡幅度、次级变化等结构特征,并在该事件的初期发现了持续时间约 6 a 的强烈火山信号,推测这些信号来自 Toba 火山,由此建立了“72 ka 事件”与 Toba 火山的联系^[6]。火山喷发形成的硫酸盐气溶胶微粒可在全球范围内扩散,模拟结果显示其在大气中停留时间可达 5~6 a 之久^[25],所产生的高异常 S- SO_4^{2-} 含量可作为气候地层中火山活动的重要识别标志^[26]。GISP2 冰芯正是在 DO20 暖锋结束时发现持续时间约 6 a 的 S- SO_4^{2-} 高异常变化,提供了迄今为止最为详细的 Toba 火山喷发与大气/气候对比关系的记录^[6]。按照 Zielinski 等^[6]的估算,在 6 a 时间内火山喷发到平流层的气溶胶颗粒物有 2 200~4 400 Mt,得出结论即 Toba 火山喷发并未触发“72 ka 事件”,更没有驱动气候进入 MIS4 冰期时代,其直接作用增大了“72 ka 事件”前 200 a 的降温幅度,同时指出当气候系统处于一种不稳定且对类似于火山灰气溶胶这类强迫因子比较敏感的状态时,气候变冷的趋势将会相对增大。

南、北两极冰芯记录的对比有助于识别低纬火山喷发的气候意义。然而,现有南极冰芯没有在 72 ka BP 左右发现像格陵兰冰芯一样火山活动印迹。一般认为这是由于南极冰芯的沉积速率造成的,如 EDC^[27]、Byrd^[28]、Vostok^[29]等冰芯的沉积速率远低于格陵兰冰芯(GISP2),难以记录下 6 a 左右的 S- SO_4^{2-} 高异常现象。然而南极最近钻取的 EDML 冰芯^[30],在 72 ka BP 左右平均沉降速率约 5 cm/a,几乎和格陵兰冰芯相媲美但是也没有发现 Toba 火山喷发的印迹。这说明还有其他原因造成火山印迹在南、北两极冰芯记录的差异^[31],如火山灰向两极传输沉积过程的损耗、火山信号恢复过程中的技术差别等原因。正是这些不确定因素限制了全球气候对火山喷发响应程度的判定。

2.3 洞穴石笋记录

目前,对 Toba 火山/气候事件的理解主要来自格陵兰冰芯(GISP2),因此,获取北高纬以外特别是中低纬地区定年准确的高分辨率记录,对全面理解“72 ka 事件”的成因机制及其与 Toba 火山喷发的关系具有非常重要的意义。全球范围特别是中低纬地区广泛分布的具有年旋回沉积界面的石笋是另一种有价值的古气候载体,其在测年和寻求高分辨率

气候替代指标方面有着独特的优势^[32~36],如洞穴碳酸盐高精度热电离质谱测年^[37,38],使区域性洞穴气候记录与全球气候事件逐一对比成为可能^[39]。

在对神农架天鹅洞石笋进行研究时,刘殿兵等^[40]发现其抛光面岩性存在显著的沉积间断,此间断实测年龄又正值 Toba 火山喷发期,这一高海拔洞穴石笋发育的中断证明了在此时间段内气候确存在着异常,且这一沉积间断大致对应于葫芦洞 72.7 ~ 72 ka BP 干事件^[4],类似于法国西南洞穴石笋的 Villars 冷事件^[41]。此外,南京葫芦洞石笋氧碳同位素记录对于 Toba 火山喷发这一事件响应尤其明显, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化呈现快速冷、暖双向转换,变幅达 2.5‰,冷谷持续时间 700 a 左右^[39],这一降温信号在以色列 Soreq 洞穴^[42]和美国 Crevice 洞穴^[43]石笋记录中都有明显反映。神农架山宝洞高分辨率石笋记录给出 Toba 火山喷发的 U/Th 年龄为 (73 ± 0.4) ka^[44](图 1),这与基于 K/Ar 法、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 以及裂变径迹法的最佳估计年代 (74 ± 2) ka BP 基本一致^[45,46]。

2.4 其他记录

Rousseau 等^[50]发现黄土高原中黄土—古土壤序列 S1/L1 处季风快速减弱,认为最有可能的原因是 Toba 火山喷发引起的大洋环流快速重组。以 3 个非洲湖泊沉积作为研究对象发现^[51],南亚以外地区在约 73 ka BP 同样受 Toba 火山喷发的影响,并且依据其同位素分析,得出当时年平均气温和降水的变化幅度可能比现今估计的都要大的推断^[22]。

3 讨论与展望

“72 ka 事件”是发生在 DO19 与 DO20 之间的冷事件,对于这些冷事件的成因机制一般认为是北大西洋冰盖坍塌,进而导致大量淡水注入北大西洋北部,从而减弱了北大西洋经向翻转环流 (AMOC),最终导致冰期千年尺度降温^[52]。然而已有的北大西洋海洋沉积研究表明,在“72 ka 事件”期间找不到对应的冰漂碎屑层,并且该事件的降温幅度明显高于末次冰期其他同类事件。这些因素促使人们将“72 ka 事件”的影响机制与 Toba 火山喷发联系起来。目前关于 Toba 火山喷发对区域和全球气候的影响存在 2 种不同的观点:一种观点认为确实有影响,主要是以地质学和格陵兰冰芯地球化学等记录为代表;另外一种观点认为不存在实质性影响,主要是以海表温度、全球响应范围等证据为代表。

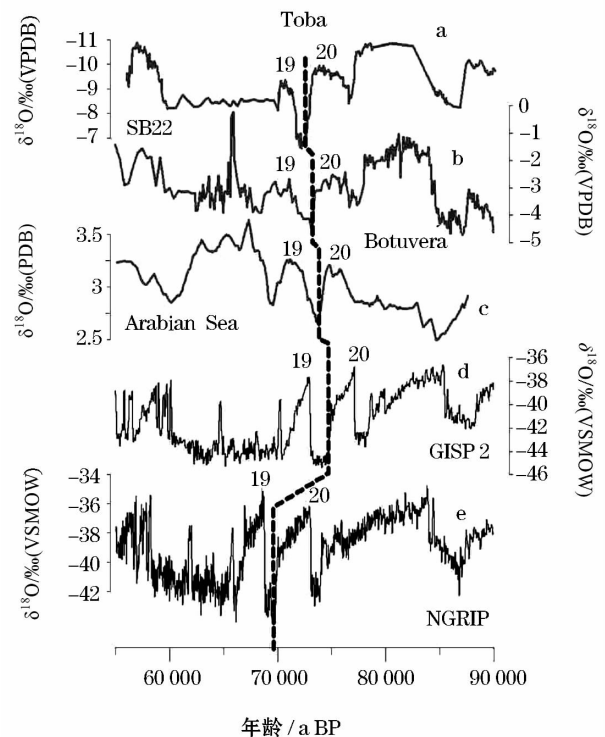


图 1 石笋、海洋与冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录比较图

Fig.1 Comparison among the values of $\delta^{18}\text{O}$ from stalagmite, ocean and ice core

(a) 三宝洞^[44], (b) Botuverá 洞穴^[47], (c) Arabian Sea 岩芯^[48], (d) GISP2^[2], (e) North GRIP^[49], 虚线指示了各个记录中最近一次 Toba 火山喷发的年代

The curves shows $\delta^{18}\text{O}$ values for (a) Sanbao cave, (b) Botuverá cave, (c) Arabian Sea core, (d) GISP2 and (e) North GRIP. The dashed line denotes the isochronous time marker of the Toba ash

3.1 Toba 火山喷发对区域和全球气候存在影响

3.1.1 Toba 火山喷发与“72 ka 事件”发生的时间

Toba 最近一次喷发是第四纪火山喷发中规模最大的一次^[7],引起了许多学者的关注。早期对 Toba 火山的研究,着重于火山喷发的时间,以期从时间上获得火山活动与气候旋回的关系^[53]。进行年龄测定所选用的样品是最新的 Toba 火山灰,其 K-Ar 测定年龄为 (75 ± 12) ka (黑云母矿物)和 (74 ± 3) ka (透长石矿物)^[44]。而后,Chesner 等^[46]用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定该层火山灰透长石年龄为 (73 ± 4) ka,并结合上述 K-Ar 年龄,给出该火山喷发的最佳年龄值为 (74 ± 2) ka。若这一年龄值可靠,那么与海洋岩芯记录 (73.5 ± 3) ka^[22]、冰芯记录 (71.1 ± 5) ka^[6]以及石笋记录 (72.5 ± 0.25) ka^[39]基本一致。

3.1.2 Toba 火山喷发和有史记载的火山喷发对比

对有历史记载的火山喷发如 Tambora、Krakatau、Agung 以及 Pinatubo 等研究时发现,大型

的火山喷发均导致了人类的大量死亡以及全球意义上的气温下降,持续时间均达一年或更久^[54~58]。其中 Pinatubo 火山爆发时,2 000 万 t 的二氧化硫气体被喷入菲律宾的上空,反射回太空的太阳能射线增加了 3.8%,在其后的一两年里,二氧化硫气团仍在全球流动;相较于 Tambora 火山爆发(有史记载最大的火山喷发)所制造出的 100 ~ 200 km³ 火山碎屑物^[45,46],Toba 火山喷出物是其 15 ~ 20 倍,为 2 500 ~ 3 000 km³^[41,59],另外就火山喷发指数(VEI)而言,Toba 火山的 VEI 是 8,比 Tambora 火山的 VEI 7 大一个等级^[60]。将今论古而言,Toba 火山的喷发对环境以及气候必定存在很大的影响力,如果现今有火山喷发强度类似于 Toba 火山,那么对于人类的生产生活具有不可想象的破坏作用。

3.1.3 Toba 火山喷发与“72 ka 事件”的模拟结果

早期就有史记载的火山喷发对气候的影响进行研究^[61]后,建立了 Toba 火山喷发—气候影响模型^[62],这一模型得到了 Williams 等^[22]的论证。研究 Toba 火山喷发物至平流层后所产生的影响,进而所得出的大部分的模型^[63,64]指出,火山喷发后全球气候处于持续变冷状态,特别是在最初的 200 a^[6]。Bekki 等^[25]的模拟结果显示 Toba 火山喷发产生的硫酸盐悬浮质在大气中可以停留 5 ~ 6 a 之久,足以使区域降温 10 ~ 15 °C 以及全球降温 3 ~ 5 °C^[65]。另外,利用 Pinatubo 火山喷发得出的全球大气循环模型^[63]指出,全球最初气温在 10 a 内从 20 K 降到 10 K,但没有迹象表明冰期的开始。

3.2 Toba 火山喷发对区域和全球气候不存在实质性影响

3.2.1 Toba 火山喷发前后多项记录无实质变化

从阿拉伯海 SO90-93 KL 岩芯记录中发现,在 Toba 火山喷发前后其海表温度均处于持续稳定的下降状态^[11],印度洋和东海的海洋钻孔岩芯同样发现相似的特征^[45,66],MD97-2151 记录了东海在 Toba 火山喷发后 1 000 a 内海表温度呈波动状降低了 1 °C^[67],都不存在大的波动。Cohen 等^[68]在 2007 年总结了前人研究工作后,指出在 Toba 火山喷发前,持续的干旱就已经对赤道非洲地区存在影响,由 Toba 火山喷发引起的干旱似乎只是这个长期干旱中的一部分。近期的一些计算机模拟显示 Toba 火山喷发对气候的影响是短尺度的。另外在生物影响方面的研究发现,苏门答腊岛的猩猩数量在火山喷发之后有扩张的趋势^[69],没有证据显示 Toba 火山喷发对其产生灾难性的影响^[15]。

3.2.2 Toba 火山喷发后中低纬响应反不如高纬强烈

“72 ka 事件”在格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中的发生时间是在 DO19 与 DO20 之间,结束时的温度变幅在整个 3 000 m 冰芯中为最大的变幅之一。按 0.67‰/°C 分馏系数^[3]计算,其温度变幅与 YD 事件几乎相当,达到 10 °C 左右;按²⁹N₂/²⁸N₂ 比率计算^[4],其温度变幅可达 16 °C。“72 ka 事件”在南京汤山葫芦洞石笋同样有明显记录,其 $\delta^{18}\text{O}$ 振荡幅度超过 2.5‰^[5]。然而,这种大幅度的温度变化在北大西洋高分辨率深海记录中^[70]却表现不明显。虽然阿拉伯海钻孔记录对这一降温事件具有明显的响应关系^[17],但其强度只有冰芯变幅的 1/2 左右。在格陵兰冰芯中如此强烈的千年冷事件在中低纬度地区并没有强烈的响应,因此,有学者提出仅依赖于格陵兰冰芯来研究 Toba 火山喷发与“72 ka 事件”间的关系是欠妥的^[15]。

3.3 展望

针对目前研究中存在的问题,在未来的研究中应加强 2 个方面的工作:一方面应重视提高气候记录分辨率和定年精度,从解剖“72 ka 事件”的结构特征入手,探明事件的起/止突变速率、内部次级振荡变化特征,用多种方法分析事件的诱发因素,从而进一步判断这些因素与火山喷发的耦合关系;另一方面应加强在气候地层中火山喷发直接证据的研究。火山喷发形成硫酸盐气溶胶微粒全球扩散,由此产生的高异常 S-SO₄²⁻ 含量可以作为气候地层中火山活动的重要识别标志^[30]。长期以来,S-SO₄²⁻ 的探测所需的高精度、低下限和低背景噪音等高标准测试要求无法实现^[71],基于同步辐射的 X 射线荧光微束原位无损分析(R-μXRF)发展为低下限和低背景噪音的元素分析成为可能,其连接 X 射线吸收近边结构谱(XANES),可检测瞬间的 S-SO₄²⁻ 的微弱变化^[72],为火山喷发的准确识别提供了可能。因此 S-SO₄²⁻ 的探测技术不断完善,以及事件记录的分辨率不断提高,将有助于加强我们对“72 ka 事件”驱动机制及其对 Toba 火山喷发的响应关系的深入理解。

参考文献 (References):

- [1] Dansgaard W, Johnsen S, Clausen H, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record [J]. *Nature*, 1993, 364(6 343): 218-220.
- [2] Grootes P, Stuiver M, White J, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores [J]. *Nature*, 1993, 366(6 455): 552-554.
- [3] Johnsen S, Clausen H, Dansgaard W, et al. Irregular glacial in-

- terstadials recorded in a new Greenland ice core [J]. *Nature*, 1992, 359(6 393): 311-313.
- [4] Lang C, Leuenberger M, Schwander J, *et al.* 16 °C rapid temperature variation in Central Greenland 70,000 years ago [J]. *Science*, 1999, 286(5 441): 934-937.
- [5] Wang Y, Cheng H, Edwards R, *et al.* A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 2001, 294(5 550): 2 345-2 348.
- [6] Zielinski G, Mayewski P, Meeker L, *et al.* Potential atmospheric impact of the Toba mega-eruption 71,000 years ago [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(8): 837-840.
- [7] Rose W, Chesner C. Dispersal of ash in the great Toba eruption, 75 ka [J]. *Geology*, 1987, 15(10): 913-917.
- [8] Rose W I, Chesner C A. Worldwide dispersal of ash and gases from earth's largest known eruption: Toba, Sumatra, 75 ka [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1990, 89(3): 269-275.
- [9] Rampino M R, Self S. Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba super-eruption [J]. *Nature*, 1992, 359(6 390): 50-52.
- [10] Schulz H, von Rad U, Erlenkeuser H. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110,000 years [J]. *Nature*, 1998, 393(6 680): 54-57.
- [11] Gasparotto G, Spadafora E, Summa V, *et al.* Contribution of grain size and compositional data from the Bengal Fan sediment to the understanding of Toba volcanic event [J]. *Marine Geology*, 2000, 162(2/4): 561-572.
- [12] Schulz H, Emeis K C, Erlenkeuser H, *et al.* The Toba volcanic event and interstadial/stadial climates at the marine isotopic stage 5 to 4 transition in the northern Indian Ocean [J]. *Quaternary Research*, 2002, 57(1): 22-31.
- [13] McGuire W, Howarth R, Firth C, *et al.* Correlation between rate of sea-level change and frequency of explosive volcanism in the Mediterranean [J]. *Nature*, 1997, 389(6 650): 473-476.
- [14] Alley R B, ágústssdóttir A M. The 8k event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10/11): 1 123-1 149.
- [15] Halsam M, Petroglia M. Comment on "Environmental impact of the 73 Ka Toba super-eruption in South Asia" by Williams M A J, Ambrose S H, van der Kaars S, Ruehlemann C, Chattopadhyaya U, Pal J, Chauhan P R. [Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 284: 295-314] [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296: 199-203.
- [16] Liang Xirong, Wei Gangjian, Shao Lei, *et al.* Records of Toba eruption in the South China Sea—Chemical characteristics of the glass shards from ODP11473A [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(10): 871-878.
- [17] Pattan J, Shane P, Banakar V. New occurrence of Youngest Toba Tuff in abyssal sediments of the Central Indian Basin [J]. *Marine Geology*, 1999, 155(3/4): 243-248.
- [18] Song S, Chen C, Lee M, *et al.* Newly discovered eastern dispersal of the youngest Toba Tuff [J]. *Marine Geology*, 2000, 167(3): 303-312.
- [19] Böhning C, Sarnthein M. Toba ash layers in the South China Sea: Evidence of contrasting wind directions during eruption ca. 74 ka [J]. *Geology*, 2000, 28(3): 275-278.
- [20] Liu Z, Colin C, Trentesaux A. Major element geochemistry of glass shards and minerals of the Youngest Toba Tephra in the southwestern South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(1): 99-107.
- [21] Leuschner D C, Sirocko F. The low-latitude monsoon climate during Dansgaard-Oeschger cycles and Heinrich events [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1/5): 243-254.
- [22] Williams M A J, Ambrose S H, van der Kaars S, *et al.* Environmental impact of the 73 ka Toba super-eruption in South Asia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 284(3/4): 295-314.
- [23] Ambrose S H. Late Pleistocene human population bottlenecks, volcanic winter, and differentiation of modern humans [J]. *Journal of Human Evolution*, 1998, 34(6): 623-651.
- [24] Williams M, Ambrose S H, van der Kaars S, *et al.* Reply to the comment on 'Environmental impact of the 73 ka Toba super-eruption in South Asia' by Williams M A J, Ambrose S H, van der Kaars S, Ruehlemann C, Chattopadhyaya U, Pal J, Chauhan P R [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296(1/2): 204-211.
- [25] Bekki S, Pyle J, Zhong W, *et al.* The role of microphysical and chemical processes in prolonging the climate forcing of the Toba eruption [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(19): 2 669-2 672.
- [26] EPICA Community Members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core [J]. *Nature*, 2004, 429(6 992): 623-628.
- [27] Blunier T, Brook E J. Timing of Millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the Last Glacial period [J]. *Science*, 2001, 291(5 501): 109-112.
- [28] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, *et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica [J]. *Nature*, 1999, 399(6 735): 429-436.
- [29] EPICA Community Members. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica [J]. *Nature*, 2006, 444(7 116): 195-198.
- [30] Zielinski G A. Use of paleo-records in determining variability within the volcanism-climate system [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1/5): 417-438.
- [31] Cole-Dai J, Mosley-Thompson E, Wight S P, *et al.* A 4100-year record of explosive volcanism from an East Antarctica ice core [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (D19): 24 431-24 441.
- [32] Hu C, Henderson G M, Huang J, *et al.* Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266(3/4): 221-232.
- [33] Ma Zhibang, Li Hongchun, Xia Ming, *et al.* Paleotemperature

- changes over the past 3 000 years in eastern Beijing, China: A reconstruction based on Mg/Sr records in a stalagmite[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 395-400.
- [34] Hu Chaoyong, Huang Junhua, Yang Guanqing, *et al.* Carbon and oxygen isotopic composition in a stalagmite from Qingjiang, Hubei, and their paleoclimatic significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 388-390. [胡超涌, 黄俊华, 杨冠青, 等. 湖北清江石笋的碳氧同位素组成及其古气候意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 388-390.]
- [35] Qin Xiaoguang, Liu Dongsheng, Tan Ming, *et al.* Grey characteristics of microbanding of stalagmite in Shihua Cave, Beijing and its climatic signification(I)—The study of microstructure of microbanding[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(1): 91-96.
- [36] Cai Yanjun, Cheng Hai, An Zhisheng, *et al.* The study on the initial thorium correction of the ^{230}Th - ^{234}U - ^{238}U dating of the speleothem by using isochronment method[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 414-420. [蔡演军, 程海, 安芷生, 等. 洞穴碳酸盐 ^{230}Th - ^{234}U - ^{238}U 测年初始钍校正的等时线研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 414-420.]
- [37] Edwards L R, Chen J, Wasserburg G. ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 81(2/3): 175-192.
- [38] Li W X, Lundberg J, Dickin A, *et al.* High-precision mass-spectrometric uranium-series dating of cave deposits and implications for palaeoclimate studies[J]. *Nature*, 1989, 339(6 225): 534-536.
- [39] Wu Jiangying, Wang Yongjin, Shao Xiaohua, *et al.* Instability of the late Pleistocene East Asian monsoon climate—Evidence from the variation of the stable isotope composition of a cave stalagmite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(3): 413-419. [吴江滢, 汪永进, 邵晓华, 等. 晚更新世东亚季风气候不稳定性的洞穴石笋同位素证据[J]. 地质学报, 2002, 76(3): 413-419.]
- [40] Liu Dianbing, Wang Yongjin, Chen Shitao. DO events during 76 ~ 58 ka B. P. from a stalagmite in Tian'e Cave, Shennongjia area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 131-138. [刘殿兵, 汪永进, 陈仕涛. 神农架天鹅洞石笋 76 ~ 58 ka B. P. 时段 DO 事件[J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 131-138.]
- [41] Genty D, Blamart D, Ouahdi R, *et al.* Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data[J]. *Nature*, 2003, 421(6 925): 833-837.
- [42] Frumkin A, Ford D C, Schwarcz H P. Continental oxygen isotopic record of the last 170,000 years in Jerusalem[J]. *Quaternary Research*, 1999, 51(3): 317-327.
- [43] Dorale J A, Edwards R L, Ito E, *et al.* Climate and vegetation history of the midcontinent from 75 to 25 ka: A speleothem record from Crevise Cave, Missouri, USA[J]. *Science*, 1998, 282(5 395): 1 871-1 874.
- [44] Xia Zhifeng, Kong Xinggong, Jiang Xiuyang, *et al.* Precise dating of East-Asian-Monsoon D/O events during 95-56 ka BP: Based on stalagmite data from Shanbao Cave at Shennongjia, China[J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 50(2): 228-235.
- [45] Ninkovich D, Shackleton N, Abdel-Monem A, *et al.* K-Ar age of the Late Pleistocene eruption of Toba, north Sumatra[J]. *Nature*, 1978, 276(5 688): 574-577.
- [46] Chesner C, Rose W, Deino A, *et al.* Eruptive history of Earth's largest Quaternary caldera (Toba, Indonesia) clarified[J]. *Geology*, 1991, 19(3): 200-203.
- [47] Cruz F W, Burns S J, Karmann I, *et al.* Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil[J]. *Nature*, 2005, 434(7 029): 63-66.
- [48] Jung S J A, Kroon D, Ganssen G, *et al.* Enhanced Arabian Sea intermediate water flow during glacial North Atlantic cold phases[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 280(1/4): 220-228.
- [49] Andersen K K, Azuma N, Barnola J M, *et al.* High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period[J]. *Nature*, 2004, 431(7 005): 147-151.
- [50] Rousseau D D, Kukla G. Abrupt retreat of summer monsoon at the S1/L1 boundary in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 26(1/3): 189-198.
- [51] Scholz C A, Johnson T C, Cohen A S, *et al.* East African megadroughts between 135 and 75 thousand years ago and bearing on early-modern human origins[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(42): 16 416.
- [52] Broecker W S. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change[J]. *Nature*, 1994, 372(6 505): 421-424.
- [53] Oppenheimer C. Limited global change due to the largest known Quaternary eruption, Toba ≈ 74 kyr BP? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(14/15): 1 593-1 609.
- [54] Self S, Rampino M R. The 1883 eruption of Krakatau[J]. *Nature*, 1981, 294(5 843): 699-704.
- [55] Sear C, Kelly P, Jones P, *et al.* Global surface-temperature responses to major volcanic eruptions[J]. *Nature*, 1987, 330(6 146): 365-367.
- [56] Kelly P, Jones P, Pengqun J. The spatial response of the climate system to explosive volcanic eruptions[J]. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(5): 537-550.
- [57] Parker D, Wilson H, Jones P, *et al.* The impact of mount pinatubo on world[J]. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(5): 487-497.
- [58] Sadler J, Grattan J. Volcanoes as agents of past environmental change[J]. *Global and Planetary Change*, 1999, 21(1/3): 181-196.
- [59] Gates A E, Ritchie D. Encyclopedia of Earthquakes and Volcanoes[M]. New York: Facts on File, 2007: 325-326.
- [60] De Silva S. Arc magmatism, calderas and supervolcanoes[J]. *Geology*, 2008, 36(8): 671-672.
- [61] Rampino M R, Self S. Historic eruptions of Tambora (1815), Krakatau (1883), and Agung (1963), their stratospheric aerosols, and climatic impact[J]. *Quaternary Research*, 1982, 18(2): 127-143.

- [62] Pittock A B. Beyond Darkness: Nuclear Winter in Australia and New Zealand[M]. South Melbourne: Macmillan & Co Limited, 1987: 264.
- [63] Jones G S, Gregory J M, Stott P A, *et al.* An AOGCM simulation of the climate response to a volcanic super-eruption[J]. *Climate Dynamics*, 2005, 25(7): 725-738.
- [64] Robock A, Ammann C M, Oman L, *et al.* Did the Toba volcanic eruption of ~ 74 ka BP produce widespread glaciation? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D10): D10107.
- [65] Rampino M R, Ambrose S H. Volcanic winter in the Garden of Eden: The Toba supereruption and the late Pleistocene human population crash[M] // McCoy R W, Heiken G, eds. *Volcanic Hazards and Disasters in Human Antiquity*. New York: Geological Society of America, 2000, 345: 71-82.
- [66] Lee M Y, Wei K Y, Chen Y G. High resolution oxygen isotope stratigraphy for the last 150,000 years in the southern South China Sea: Core MD972151[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1999, 10(1): 239-254.
- [67] Huang C Y, Zhao M, Wang C C, *et al.* Cooling of the South China Sea by the Toba eruption and correlation with other climate proxies ~ 71000 years ago[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(20): 3 915-3 918.
- [68] Cohen A S, Stone J R, Beuning K R M, *et al.* Ecological consequences of early Late Pleistocene megadroughts in tropical Africa [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(42): 16 422.
- [69] Steiper M E. Population history, biogeography, and taxonomy of orangutans (Genus: Pongo) based on a population genetic meta-analysis of multiple loci[J]. *Journal of Human Evolution*, 2006, 50(5): 509-522.
- [70] Bond G, Broecker W, Johnsen S, *et al.* Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice [J]. *Nature*, 1993, 365(6 442): 143-147.
- [71] Frisia S, Badertscher S, Borsato A, *et al.* The use of stalagmite geochemistry to detect past volcanic eruptions and their environmental impacts[J]. *PAGES News*, 2008, 16(3): 24-26.
- [72] Cuif J P, Dauphin Y, Doucet J, *et al.* XANES mapping of organic sulfate in three scleractinian coral skeletons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(1): 75-83.

The Relation between the 72 ka BP Event and the Toba Super-eruption

Wu Shuainan, Chen Shitao, Duan Fucui

(College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: The abrupt cooling event occurred about 72 (the 72 ka Event) is the largest climate change during the last glacial period. At the same time a super-eruption of Toba volcano, the largest explosive eruption over the past two million years, erupted in northern Sumatra, with a Volcanic Explosivity Index of magnitude 8. It always deserves special attention for the relation between the 72 ka Event and the Toba Super-eruption. Therefore, an in-depth study of the 72 ka Event should be useful for further evaluating the environment effect of the eruption and refining the mechanism of the abrupt events during the last glacial period. Here, we make a systematic review about the research achievements from different fields such as marine cores, ice cores, stalagmites, loess, lakes and so on. These records showed different expressions on the cold event occurred about 72 ka BP and/or the Toba eruption and their relations. Based on the timing of this cold event and the Toba eruption, and the operating mechanism of the volcanic eruption on climate, the eruption has substantial impact on climate. This impact is well documented by Greenland ice core records, and further supported by climate models. Nevertheless, marine core records in low latitudes did not exhibit an obvious climate change around the super eruption, and, at least, the amplitude of the variation is not strong as one in the high latitude. Also, paleontological evidences show that the Toba eruption did not make a catastrophic effect on the living environment. So, the relation between the 72 ka Event and the Toba Super-eruption is still being hotly debated. The further progress depends not only on developing resolution and chronological precision of climate records, but also on detecting the evidence of volcanic eruptions as well.

Key words: 72 ka Event; Mechanism; Toba super-eruption; Relation.