

100M a 以来若干重大地质事件与 全球气候变化

胡修棉 王成善

(成都理工学院, 四川成都 610059)

摘 要 重大地质事件深刻地间接或直接地影响、决定和改变着全球气候变化, 对全球气候变化起着催化和逆化的作用。本文通过对赛诺曼期/土伦期(C/T)、白垩纪/第三纪(K/T)、古新世/始新世(P/E)、始新世/渐新世(E/O)、中中新世(MM)等几次重大地质事件与气候变化关系的比较性研究, 初步探讨了重大地质事件与全球气候变化的关系。

关键词 地质事件, 气候变化, 古气候, 新生代, 全球变化

新生代以来, 全球气候逐渐变冷, 从稳定温暖、两极无冰的中白垩世演化成现今常年有冰的极端寒冷气候。新生代变冷过程并非单一平衡渐变的, 其总体表现为变冷趋势下叠加着急剧的气候波动。令人十分惊奇的是, 100M a 以来几次重大事件界线附近无一例外地 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 发生剧烈波动。重大地质事件与新生代气候变化关系如何? 地质事件在气候变化中起着什么样的作用? 地质事件对全球气候变化的作用方式? 地质事件在生物演化上的反映? 对于这些问题的问答, 涉及到地质历史过程中古气候的重塑, 是深刻理解和揭示过去全球变化(事件、气候)的关键和核心, 故而具有重要的科学和实践意义。就目前研究进展看, 我们还很难准确地回答事件与全球气候变化的内在确切关系, 主要原因在于: 对过去全球气候变化仅限于现有资料的推测, 并不完全通晓, 尚没有建立起系统、完整的理论框架; 对事件规律性及其性质缺乏最本质的认识。但可以肯定的是, 重大地质事件深刻地间接或直接地影响、决定和改

变着全球气候变化, 对全球气候变化起着催化和逆化的作用。本文试图通过对赛诺曼期/土伦期(C/T)、白垩纪/第三纪(K/T)、古新世/始新世(P/E)、始新世/渐新世(E/O)、中中新世(MM)等几次重大地质事件与气候变化关系的比较性研究, 初步探讨若干重大地质事件与全球气候变化之间的关系。

1 C/T 缺氧事件与气候变化

中白垩世晚赛诺曼期-早土伦期, 全球范围内广泛分布富含有机碳的沉积物^[1-2], 迄今科学界已趋向于接受 Schlanger & Jenkyns(1976)^[3]提出的“缺氧事件”, 用来解释其全球性分布高碳黑色页岩的成因。界线附近 $\delta^{13}\text{C}$ 明显正偏^[4-6]、海洋生物大规模灭绝^[7]。

高温温暖的气候是促成缺氧事件的关键。中白垩世温度高, 温度梯度小, 大洋环流弱, 含氧量低, 底层水循环受限, 加之发生大规模的海侵, 在较为停滞的海洋环境下, 一旦有机质供应较多, 便极易出现缺氧状态。中白

至世全球平均表面温度比现今高 6~14^[18]。温度升高是大陆重组、海平面上升、超地幔柱 CO₂ 排气、海底加速增生等因素综合作用的结果^[9-10]。海水的含氧量取决于温度,除海水最表层外,现代大洋水温约在 0~5 之间,氧在海水中的饱和度为 7.5m l/l,而白垩纪表层以下海水温度高达 15~20,氧的饱和度应在 5.5m l/l 左右,比现代降低 2m l/l。现代深海中实际的含氧大约是 3~5m l/l,相应地,在扣除损耗后,白垩纪深海中典型的含氧量不过 2m l/l 左右。故而,一旦某些地区耗氧量较高,就很容易造成缺氧环境^[11]。

缺氧事件形成大规模黑色页岩,大量有机碳在短时期内被迅速埋藏,直接改变大气—海洋 CO₂ 平衡,大气中 pCO₂ 降低,温室效应减弱,温度将有一个持续、稳定下降的过程,影响着中晚白垩世全球气候。据估计,在事件发生期间(0.5M a)埋藏有机碳总量达 1.6×10^{18} mol, 年平均 0.32×10^{13} mol^[12]。如此大规模有机碳埋藏将导致 pCO₂ 降低,直接影响碳同位素组成并导致全球气候变冷。据证实,土伦期叠瓦蛤(欧洲) $\delta^{18}\text{O}$ 增加 2‰~3‰,温度下降 8~13^[13]。晚白垩世,南半球高纬地区存在明显的全球变冷事件^[14]。土伦—康尼亚克期最大表面层温度为 20,晚马斯特里赫特期南极地区降至 10~11,大幅度降低发生在早坎潘期及其之后^[15]。迄今我们还不完全知道这两者对应的关系,根本原因一方面在于获取的白垩纪直接古气候记录较少,另一方面在于 CO₂ 气候效应的作用过程和具体的作用方式知之甚微。

2 K/T 撞击事件与气候剧变

新生代最大规模的生物绝灭事件发生于迄今约 65M a 前的 K/T 界线。据统计,白垩纪末动植物属有 2868 个,第三纪仅剩 1502 个,属绝灭率达 48%,种的灭绝率达 60%~

80%^[16]。浮游有孔虫灭绝率极高,底栖有孔虫绝灭率相对较低,为表层短期群集绝灭事件^[7]。自 Alvarez 等(1980)^[17]首次提出小行星撞击假设用以解释这一高生物绝灭和富含 Ir 等地外指示元素的 K/T 事件以来,迄今全球 Ir 异常记录 K/T 事件剖面已达 120 多个。目前大部分学者都趋于认同 K/T 事件为一次地外撞击事件。

撞击产生激烈的物理和化学作用,将大量气化物质、细微的熔融溅射物质和尘埃等输送到平流层及近地空间,屏蔽太阳辐射,使地面急剧降温,形成漫长而黑暗的冬天。肖志峰等(1995)^[18]模拟计算了 K/T 撞击能量 (1.3×10^8 Mt TNT),尘埃总量 (1×10^{14} t) 和尘埃密度 ($2000\text{g}/\text{m}^3$),利用零维能量平衡模式模拟撞击气候效应后,认为撞击降温最低至 225K (-48),降温持续近 3 年,缓慢升温至正常水平需近 14 年,整个降温效应发生 17 年左右。

撞击作用使温度迅速降低,海洋 pH 值增大,海洋中 CO₂ 溶解度增大,直接导致大气中 CO₂ 含量的下降,即使考虑撞击靶岩碳酸盐岩释放的 CO₂ 量,其含量仍是下降^[19]。大气和海洋 CO₂ 重新平衡需 $10^3 \sim 10^5$ a,可用以解释事件后一定时期内气候变冷,此证实 K-T 之交时海洋深部水团温度下降 3~6^[20-21]。

3 P/E 升温事件

古新世末—始新世初界线附近在岩性、古气候、古生物、古海洋、古大气等方面均发生明显变化^[22]。有孔虫氧同位素揭示表层水温升高 5~6,最高达 20,底层水温升高 4,最高达 15,整个温度更替不超过 1 万年,随后 10 万年内逐渐降温^[23]。且温度发生差异性下降,底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 下降 2.0‰,深水浮游中间类型 $\delta^{18}\text{O}$ 下降 1.5‰,浅水浮游型 $\delta^{18}\text{O}$ 下降 1.0‰^[24]。

这一气候更替同时反映在粘土矿物组合

变化上。南极威德尔海 690B 井资料显示^[25]: 晚古新世末蒙脱石含量从 60% ~ 90% 增至 90% ~ 95%, 伊利石含量极微, 而高岭石从 5% 增至 20% ~ 30%。蒙脱石形成于热带-半热带排水差、潮湿而后持续干旱的气候, 高岭石常见于高降水量、排水好的热带土壤中, 其形成温度不低于 15^[26], 而伊利石一般形成于寒冷地区和沙漠地区极低风化率的气候条件。结合当时大气和海洋条件, 表明当时全球气候温暖, 降水量大, 大陆发生强烈的风化作用。

底层水迅速变暖是导致底栖有孔虫大规模绝灭的主要原因^[23, 27], 40% 深水生物分类单元在不到 1 万年内迅速绝灭^[24], 33% ~ 65% 深水底栖有孔虫消失, 浮游绝灭率极低, 为中深水短期群集(D-S)型绝灭事件^[7]。导致早第三纪温度上升的因素有: 陆壳产物的增加^[28]、热液活动加强^[29]、沼泽和湿地产生的甲烷大量进入大气^[30]、由于陆地减少和低纬度次大陆海增加导致反射率的降低^[8]。

4 E/O 骤冷事件

晚始新世-早渐新世是地球历史上一个重要的全球气候加速变冷时期, 生物演化加速, 天体撞击频繁, 被认为是由温暖稳定的晚白垩世、早第三纪转变为寒冷波动的冰期的临界转折点。生物绝灭出现两个特点: 表层浮游有孔虫绝灭率高, 底栖有孔虫绝灭率中等; 绝灭持续时间长(约 4M a)^[7], 浅水软体动物绝灭率达 68% ~ 97%^[31]。迄今约 35.5M a, 底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均发生正偏, $\delta^{13}\text{C}$ 增加 0.4‰~ 0.8‰, 最高值 1.3‰~ 1.7‰, $\delta^{18}\text{O}$ 增加 3‰, 深水降温 7 ~ 8^[32-33], 整个事件发生迅速而简短, 持续时间不超过 20 万年^[23]。高纬区变冷, 地球气候系统从赤道到两极温差增大, 流速加强, 促使营养元素的供应增加, 大洋生产力上升, 导致 $\delta^{13}\text{C}$ 正偏^[23]。

$\delta^{18}\text{O}$ 正偏反映始新世末南极洲构造隔

离增强, 极地冰盖出现, 早渐新世寒冷水体的形成^[34]。骤冷气候的直接结果是导致冰盖的突然增大, 已接近现代的规模, 只是持续时间不长, 之后又出现萎缩。导致长时间气候持续变冷的因素有: 海退导致陆架暴露, 反射率低, 冷水 CO_2 溶解度高, 大气中 pCO_2 降低。全球聚冷是多种因素综合作用的结果, 是一个持续渐变的降温过程, 虽然整个表现为气候临界状态下的突变。

最近 Robert & Kennett (1997)^[35] 利用粘土矿物研究了这一气候更替。渐新世初, 伊利石显著增高, 蒙脱石和高岭石降低。大量伊利石(5% ~ 30%)与绿泥石和自由混层(大于 5%)一起出现, 这些矿物一般出现在寒冷地区土壤或弱风化沙漠和撞击活动区表面。南极洲此期无明显构造活动, 这表明此期化学作用风化弱, 基底侵蚀增强, 冰土圈扩大, 为典型的极地寒冷机械风化强的气候。

晚古新世撞击事件在全世界范围内得以证实, 其证据有: 玻璃质飞溅状玻陨石、微玻陨石、撞击石英^[36]、焦石英、柯石英^[37]和铱异常^[38]。据估计, 这次撞击产生的能量为 $8.6 \times 10^{17} \text{ t TNT}$, 尘埃总量为 $8.9 \times 10^{12} \text{ t}$, 尘埃密度 168 g/m^2 , 引起的气候变化约 13 年^[18]。撞击产生的气候效应如何改变影响着始新世末-渐新世初温度骤降, 迄今我们还不完全知晓, 两者之间确切关系有待进一步探索和研究。

5 中中新世(MM)气候更替事件

中新世早中期, 大洋底层水温达早第三纪以后的最高值, 极地与热带的温差较小^[39], 这主要是由海侵引起的暖期持续的时间极短。中新世中晚期, 气候显著变冷, 环南极洋流的发展和南极大陆热隔离状态, 使南极大陆的覆冰不断增加。中中新世南极冰盖的形成是全球气候历史中的又一次划时代事件。之后, 全球气候从未恢复到早中新世和中中新世早期的温度^[40]。

极地变冷使大洋对流加剧,上升流发育,海洋生产力剧增,有机碳迅速埋藏,进一步导致底层水温下降, $\delta^{13}\text{C}$ 偏移。在中中新世这一短一长由暖极变冷的过程中,生物尤其是底栖生物又遭受一次大规模绝灭。据研究,深水底栖有孔虫绝灭率为 35%~52%^[7]。

青藏高原的快速升降对中中新世气候更替具有举足轻重的作用^[41-42]。高原升降加剧硅酸盐岩、碳酸盐岩化学风化,使有机碳埋藏增加,这些作用大量地消耗了大气中的 CO_2 量, $p\text{CO}_2$ 降低,形成“冰室效应”,直接导致全球气候变冷。

6 CO_2 平衡与全球事件—气候变化

大气 CO_2 含量变化与全球气候密切相关, CO_2 浓度增加将导致全球气温增加,相反, CO_2 浓度降低促使全球降温。Comp ton & M allinson (1996)^[43] 在假定风化和有机碳埋藏消耗的 CO_2 、由于平均洋中脊扩张和羽状地幔流活动产生的 CO_2 为一定的条件下,重塑了过去 100M a 间 CO_2 含量变化历史。非常有趣的是,在几次重大地质事件界线附近, CO_2 表现为明显失衡。例如,C/T、P/E 界线处 CO_2 峰值与高温期相对应;K/T 界线对应着小规模 CO_2 峰值; CO_2 亏损转换处对应着 E/O 界线附近冰川建造的首次出现;16M a CO_2 最大亏损之后紧接着发生 14.5M a~13M a 间的中中新世变冷事件; CO_2 最小亏损(4M a~5M a)对应着早上新世温暖气候。

相对 CO_2 平衡波动很大程度地反映了有机碳埋藏量的变化,特别是 C/T、P/E 和中中新世,这表明海洋和有机碳储层间的 CO_2 转移对气候具有强烈的影响。如前所述,导致大量有机碳埋藏的缺氧事件和导致海洋温度下降、pH 值增大、 CO_2 溶解度增加的撞击事件均使大气之中的 CO_2 浓度降低,温室效应减弱,都有一个降温过程,只是尚不明确知道这两次降温的持续时间。

值得注意的是,P/E 界线 CO_2 失衡发生在 $\delta^{18}\text{O}$ 最大负偏之前,而 16M a CO_2 最大亏损后紧接着发生 14.5M a~13M a $\delta^{18}\text{O}$ 正偏的气候变冷事件,这种情况可能代表了 $p\text{CO}_2$ 温室/冰室效应对气候作用之前的滞后时间(Lag time),也有可能是人为研究缺陷造成的。

理解平衡和全球事件—气候变化的关键问题是温室效应的作用机制、作用阶段和作用过程以及在各出储层间的转移。遗憾的是,对以上关键问题尚处于探索阶段,还不能对过去气候变化与 CO_2 含量作出一个具体完整的刻画。GCM 气候模拟敏感性实验已为古气候研究带来了新的发展契机,获得了不少数据。随着研究的进一步深入,古气候学家和地质学家将重塑过去 CO_2 含量与气候变化的内在关系并在此基础上探讨地质事件的贡献。

7 讨论

古新世末—始新世初(约 55M a)全球气候处于新生代高温期,之后始新世气候逐渐变冷,至始新世末渐新世初(35M a)显著变冷,发生南极冰盖增大事件。高温—降温—骤冷过程持续约 20M a 左右;渐新世气候相对稳定在一定范围内,长期看仍呈变冷趋势,至中中新世又发生气候显著更替(14.5M a~13M a)。从渐新世早期至中中新世持续时间也是 20M a 左右。现在还不完全知道这种 20M a 现象是偶合还是存在某种必然联系。新生代气候在经历了以上两个 20M a 持续变冷之后,已渐入第四纪极端寒冷的冰期气候。全球新生代气候变化整体表现为逐渐变冷,中间叠加着 P/E、早中中新世等暖期和 E/O、中中新世骤然降温冰盖增长等寒期。

地质事件和气候变化的作用因素是全球系统的。大气—海洋—陆地,陆壳—洋壳—地幔,地圈—大气圈—水圈—生物圈等等作用因素相互牵制,相互制约,或表现为气候变化

促使地质事件发生(如C/T事件),或表现为地质事件导致气候更替(如K/T),或表现为纯粹气候更替事件(如P/E,O/E和MM)。无论何种表现形式,作用于事件与气候的因素均是全方位、全球系统的。研究地质事件与全球气候变化,必须着眼于这种全球变化,从全球,甚至宇宙的角度去探索其内在规律。

地质事件对于全球气候的影响取决于事件发生的作用因素和作用方式。地质事件发生有时呈突变(K/T、E/O 撞击事件),其对气候影响亦是相对短时期内完成;有时又呈渐变(如P/E,O/E,MM 气候更替),气候变化表现为一种临界状态向另一种临界状态的转变,需一个相对长期的平衡调整期。对于C/T 缺氧事件目前尚不完全明白导致其缺氧的具体原因和过程,因而很难断定其发生的性质。

是什么因素造成气候的突然更替?从始新世末期以来全球持续变冷的动力机制是什么?长期以来,研究者从地外和地内两方面寻求答案,但地球轨道参数的改变、天体撞击和地内因素(洋流改变、高原隆升、火山爆发、反照率变化、温室效应等)在多大程度上影响、改变和决定气候的变化,迄今尚无定论。古气候系统是包括大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈所构成的结构复杂、层次繁多、极端敏感的非线性耦合系统,在这个开放的系统中,存在着一系列复杂的非线性过程,从而形成了不同时间尺度、空间尺度的气候变化,古气候演变的非平衡性、多尺度性、突变性正是其非线性本质的表现^[44]。在深入研究古气候各子系统变化的物理特征和物理过程的基础上,探讨古气候变化的动力机制,是未来研究的重点发展方向。重大地质事件与全球过去气候变化关系密切,有的直接表现为气候事件,是剖析古气候非线性系统的关键。系统、深入地开展事件与气候关系的研究,将有利于我们对过去变化过程的整体把握。随着研究进一步深入,重大地质事件与气候关系的明朗化,人类对过去气候的认识将更趋真实,

将不再面对变化多端的未来气候而束手无策。

参考文献

- 1 Jenkyns H C. *J Geol Soc London*, 1980, 137: 171-188
- 2 Farrinond P, Eglinton G, Brasseil S C. *Mar and Petrol Geol*, 1990, 7: 75-89
- 3 Schlanger S O, Jenkyns H C. *Geol Magazine*, 1976, 55: 179-184
- 4 Jarvis I, Carson G, Hart M, Leary P, Tocher B A. *SE Devon, New letters on Stratigraphy*, 1988, 18(3): 147-164
- 5 Paul C R C, Mitchell S, Lamolda M, Gorostid A. *Geol Magazine*, 1994, 131(6): 801-817
- 6 Hasegawa T. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1997, 130: 251-273
- 7 Kaiho K. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1994, 111: 45-71
- 8 Barron E J. *Earth-Sci Rev*, 1983, 19: 305-338
- 9 Barron E J, Washington W M. *J Geophys Res*, 1984, 89: 1267-1279
- 10 Caldeira K & Rampino M R. *Geophys Res Lett*, 1991, 18: 987-990
- 11 同济大学海洋地质系. 古海洋学. 上海, 同济大学出版社, 1989
- 12 Arthur M A, Dean W, Pratt L M. *Nature*, 1988, 335: 714-717
- 13 Arthur M A, Dean W & Schlanger S O. *Sundquist E T & Broecker W S*. 1985, 504-530
- 14 Crame J A, Lomas S A, Pirrie D, Luther A. *J Geol Soc London*, 1996, 153: 503-506
- 15 Ditchfield P W, Marshall J D, Pirrie D. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1994, 107: 79-101
- 16 李承森, 王宇飞, 孙启高等. 中国科学基金, 1998, (1): 21-25
- 17 Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, Michel H V. *Science*, 1980, 208: 1095-1108
- 18 肖志峰, 欧阳自远, 林文祝. 科学通报, 1995, 40(2): 151-153
- 19 肖志峰, 欧阳自远. 地质地球化学, 1995, 4: 98-

- 101
- 20 Zachos J C, Arthur M A. *Paleoceanography*, 1986, 1: 5-26
- 21 Schmitz B, Keller G, Stenvall O. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1992, 96: 233-260
- 22 刘志飞, 王成善. *地质科技情报*, 1995, 14(4): 37-42
- 23 Zachos J C, Lohmann K C, Walker J C G, Wise S W. *J Geol*, 1993, 101: 191-213
- 24 Kennett J P, Stott L D. *Nature*, 1991, 353: 225-229
- 25 Robert C, Kennett J P. *Geology*, 1994, 22: 211-214
- 26 Gaucher G. *GLobette*, 1981, 730
- 27 Schmitz B, Speijer R P, Aubry M P. *Geology*, 1996, 24(4): 347-350
- 28 Eldholm O, Thomas E. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 117: 319-329
- 29 Rea D K, Zachos J C, Owen R M, Gingerich P D. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1990, 79: 117-128
- 30 Sban L, Cirbus, Barron E J. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1992, 93: 183-201
- 31 Hansen T A. *Palaïos*, 1987, 2: 69-75
- 32 Kennett J P, Shackleton N J. *Nature*, 1976, 260: 513-515
- 33 Miller K G, Fairbanks R G, Mountain G S. *Paleoceanography*, 1987, 2: 1-19
- 34 Keigwin L D, Corliss B H. *Geol Soc America Bull*, 1986, 97: 335-345
- 35 Robert C, Kennett J P. *Geology*, 1997, 25: 587-590
- 36 Clymer A, Bice D M, Montanari A. *Geology*, 1996, 24: 483-486
- 37 Glass B P, Wu J. *Geology*, 1993, 21: 435-438
- 38 Alvarez W, Alvarez F, Michel H V, Alvarez L W. *Science*, 1982, 216: 886-888
- 39 Savin SM, et al. *Geol Soc Amer Memoir*, 1985, 163: 49-82
- 40 Kennett J P. Inc, Englewood Cliffs, 1982
- 41 Ruddiman W F, Kutzbach J E. *Jour Geophy Res*, 1989, 94(D15): 18409-18427
- 42 Ruddiman W F, Kutzbach J E. *Scientific American*, 1991, 3: 42-50
- 43 Compton J S, Mallinson D J. *Paleoceanography*, 1996, 11: 431-446
- 44 王文远, 刘嘉麒, 潘懋. 古气候演变的非线性形, 见: 北京大学国际地质科学学术研讨会文集 北京: 地震出版社, 1998, 1033-1039

SEVERAL MAJOR GEOLOGICAL EVENTS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE SINCE 100M a

Hu Xiumian, Wang Chengshan

(Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059)

Abstract Major geologic event plays a great role in climate change. It is the key to understand dynamical mechanism of global climate change. This paper discusses the relationship between climate change and five major events including Cenomanian/Turonian, Cretaceous/Tertiary, Paleocene/Eocene, Eocene/Oligocene, Middle Miocene.

Key words geological events, climate change, palaeoclimate, cenozoic, global change

〔作者简介〕 胡修棉, 男, 1974年生, 沉积学硕士。

王成善, 男, 1951年生, 教授, 博士生导师, 成都理工学院副院长。

(收稿日期: 1998-06-11)

责任编辑 尧汝英