第16卷 第2期　　空 间 科 学 学 报　　Vol.16, No.2
1996年4月　　CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE　　Apr., 1996

新生代的气候效应与碳循环*

肖志峰　欧阳自远　林文祝
（中国科学院地球化学研究所，贵阳550002）

摘　　要

对发生于新生代的6 次巨大天体撞击作用(65Ma, 34Ma, 15Ma, 2.4Ma, 1.1Ma, 0.7Ma) 的气候效应进行的模拟表明，这 6 次巨大天体撞击作用产生的尘埃进入平流层后，可使全球平均温度下降至零度以下，降温效应持续时间最长可达 30 年之久，首次在模拟中考虑全球性森林大火产生的 CO_2 和死亡生物分解生成的 CO_2 的温室效应，研究表明这两种作用使大气中 CO_2 增量最大仅达 67%，其增温效应远远低于尘埃层产生的降温作用. 但考虑全球碳循环，这两种作用对大气中 CO_2 影响可达 100 年左右.

关键词　撞击作用，气候模拟，森林大火，全球碳循环

一、引　　言

八十年代进行的气候模拟研究(从一维模式到三维GCM) 表明，能量远远大于核战争的巨大天体撞击地球，将引起持续时间更长，更为严重的气候效应.

对发生于 K/T 界线(65Ma)的天体撞击作用已进行过气候模拟[12,4]. 模拟研究表明，这次撞击事件确能引起全球气温下降到零度以下，持续时间可达 1 年之久. 但在这些模拟研究中，仅考虑撞击作用引起的尘埃的气候效应，没有考虑当地球温度下降时，全球反照率的变化和由撞击引起的全球森林大火的气候效应. 最近对古生物的研究表明，短暂的寒冷气候和全球黑暗并不能导致恐龙等生物灭绝，恶劣的气候须持续近十年之久才可能使这些生物大规模灭绝[6,10]，这说明需要对原先的模拟结果进行修正；其次，发生在新生代，有确凿证据的巨大撞击事件有 6 次，并且都能找到与之对应的古气候旋回的记录[2]，表明这 6 次撞击作用可能是这些古气候旋回的诱因. 本文拟对发生于新生代的 6 次巨大撞击作用进行模拟，并将考虑全球反照率随温度的变化，森林大火和生物绝灭产生的 CO_2 的温室效应及其对碳的地球化学循环的影响.

二、模型和模拟参数的选择

1. 模型

虽然三维气候模式比一维气候模式具有更为精确的结果，但从对核战争的气候模拟研究，二者在温度下降幅度及气候效应时间方面具有基本一致的结果[14]，而且模式简单，

* 国家自然科学基金资助项目.
本文于 1994 年 5 月 9 日收到.

计算工作量少、经济. 基于这种考虑，本工作选择零维能量平衡模式[3]:

$$C\frac{dT}{dt} = R\downarrow - R\uparrow , \tag{1}$$

C 为地气系统的有效热容量，一般取 $C=2.06\times10^8 JK^{-1}m^{-2}$[1]; $R\downarrow$ 为入射的太阳短波辐射，一般为 $R\downarrow=Q(1-\alpha)$, $Q=340W/m^2$, α 为反照率，表示物体表面所能反射的光量和它所能接收的光量之比.

考虑到大气气溶胶的影响，则上式可改写为 $R\downarrow=Q(1-\alpha)\times e^{(-\tau/\mu_0)}$, τ 为太阳波段范围内的气溶胶层的光学厚度，μ_0 是太阳天顶角的余弦. 全球平均时取 $\mu_0=0.5$[14].

(1) 式右边的 $R\uparrow$ 为净向外长波辐射; 采用经验公式 $R\uparrow=E+BT$, 其中 $E=205W/m^2$, $B=2.1W/(m^2\,℃)$, 由此，考虑气溶胶影响的能量平衡模式可表示为

$$C\frac{dT}{dt} = Q(1-\alpha)e^{-2\tau} - (205+2.1\times(T-273)). \tag{2}$$

由(2)式可知，如果全球反照率不变，则气溶胶的光学厚度是影响气温的主要因素.

2. 撞击诱发尘埃层的光学厚度

由撞击作用产生尘埃层的光学厚度可由 Turco 等[13] 给出的公式计算:

$$\tau=\tau_0 M/A. \tag{3}$$

τ 为光学厚度，τ_0 一般取为 $7m^2/g$, M 为尘埃总质量，A 为分布面积.

撞击作用产生的尘埃总量可由撞击作用的能量进行估计，对新生代6次巨大撞击作用能量及产生的尘埃已进行过计算[2]，采用这一计算结果，并按1%的尘埃进入大气并滞留平流层中，计算出大气层尘埃密度，见表1.

表1 新生6次巨大撞击作用的特征

时间 (Ma)	撞击能量 (Mt TNT)	尘埃总量 (t)	尘埃密度 (g/m^2)
65	1.3×10^9	1×10^{14}	2000
34	8.6×10^7	8.9×10^{12}	168
15	6.7×10^5	1.2×10^{11}	2.5
2.4	3.4×10^4	8.9×10^9	0.168
1.1	4×10^4	1×10^{10}	0.2
0.7	3.4×10^4	8.9×10^9	0.168

撞击作用产生的尘埃在大气中滞留时间是撞击作用气候效应的关键因素，研究表明尘埃在大气中具有复杂的运动和传输历史，涉及的过程有干沉降，重力作用和大气的侧向传输等，微米粒级，亚微米级的尘埃可在空气中停留达数百天之久.

虽然尘埃在大气中的运输过程是一个复杂的问题，但 Robock 的研究表明，可以用较为简单的数学公式来描述，他采用 Cadle 等[5] 对火山作用模拟的结果进行拟合，发现火山尘埃在远离火山口处的浓度是时间和与火山口距离的函数，采用类似的方法，假设撞击作用产生的尘埃在全球均匀分布，仅考虑随时间延长空气中尘埃浓度的变化，可由 Cadle 等[5] 的数据获得尘埃相对浓度与时间的关系为

$$\frac{G_t}{G_0}=1.2510939e^{-0.001766t}. \tag{4}$$

G_t、G_0分别表示时间为 t 和初始时刻尘埃的浓度．拟合的相关系数为 0.9886，表明这一表达式是可靠的．

由于假设尘埃在大气层中均匀分布，而大气体积恒定，则撞击尘埃的总量随时间的变化也可用(4)式表达．由(3)，(4)式得到撞击尘埃光学厚度随时间的变化 $\tau=7\times 1.2510939e^{-0.001766t}M/A$，代入(2)式可获得撞击作用气候效应的表达式；采用预测－校正法解这个微分方程，取时间步长为 $t=4$d，全球平均温度 289K，平均反照率 $\alpha=0.3$，可获得撞击作用发生后全球温度随时间的变化．

三、模拟结果

1．撞击尘埃的气候效应

按上述方法，假定地球反照率不随温度变化，取 $\alpha=0.3$，获得 6 次撞击作用引起的气候变化示于图 1．

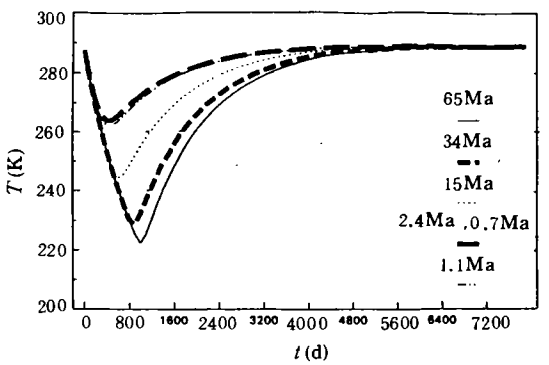


图 1　全球反照率不随温度变化时新生代 6 次巨大天体撞击作用产生的气候效应

Fig.1　The climate effect of the six large astroid impacts when the global reflect rate does not change with temperature

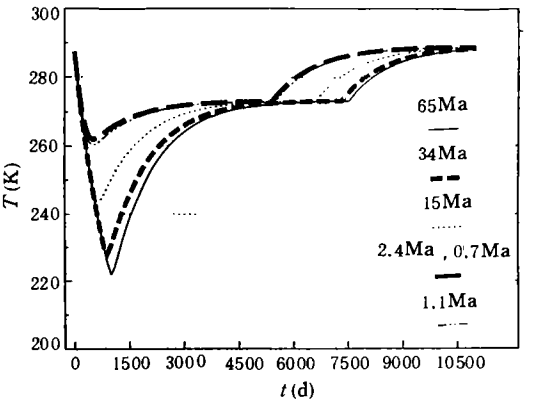


图 2　全球反照率随温度变化时新生代 6 次巨大天体撞击作用产生的气候效应

Fig.2　The climate effect of the six large astroid impacts when the global reflect rate changes with temperature

由图 1 可见，撞击作用的气候效应与撞击能量关系密切，发生于 65Ma 左右的撞击事件，能量最大，降温效应也最明显，温度最低降至低于 225K，降温阶段持续近 1000 天，缓缓升温至恢复正常需要近 5000 天，整个温度效应持续 5000 天之久．其余几次撞击事件引起类似的降温效应．只是温度下降的幅度不同，持续时间也略有差异．34Ma 的撞击事件引起的气候旋回约 4800 天，15Ma 的撞击事件诱发的气候效应持续 4000 天，而发生于 2.4Ma，1.1Ma，0.7Ma 的撞击作用的气候效应持续了约 3000 天．

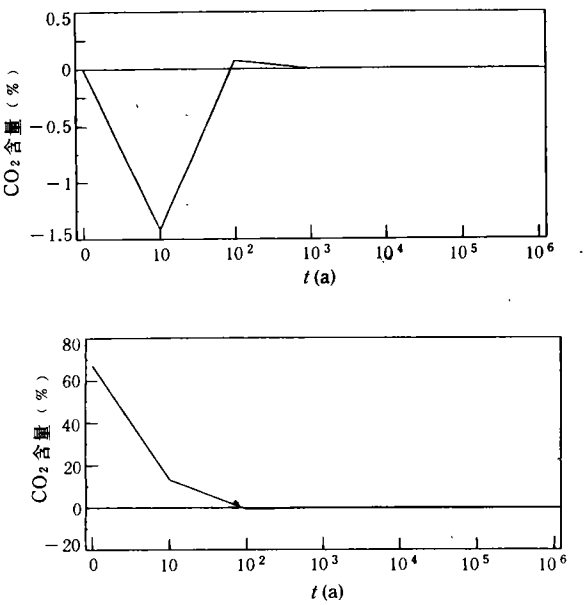
2．尘埃作用和反照率改变的联合效应

当地球平均温度下降至0℃时，可以预计，整个地球会被覆盖上一层冰，形成白色地球，此时，全球反照率也会发生变化. 因此，在撞击作用产生的气候效应模拟过程中，考虑反照率随温度的变化，当温度低于零度时，若取 $\alpha=0.397$，其余参数仍同前述，由此得出结果示于图2. 由图2可见，反照率随温度低于零度和高于零度时发生的变化，对降温阶段几乎不发生明显影响，而升温过程则变得缓慢，且在零度附近产生突变，考虑反照率随温度的变化后，各次撞击事件产生的气候效应时间将延长近一倍.

3. 森林大火等产生的 CO_2 引起的温室效应

有证据[8]表明在K/T边界曾发生过森林大火，这种全球性森林大火会产生数量巨大的 CO_2. 当大量 CO_2 进入大气层后，会引起温室效应，在考虑撞击作用的气候旋回时，这一效应不可能不考虑在内. 另一方面，即使不存在森林大火，在K/T界线事件中全球约50%的生物绝灭过程也会通过全球碳循环而影响大气中 CO_2 含量. 由于其他界线事件全球效应类似，仅考虑K/T界线事件.

Lasaga[9]的长周期全球碳循环模式为我们提供了模拟研究方便，他将全球碳分为9个库：大气圈，陆地生物圈，无生命的陆地有机物，海洋生物圈，无生命的海洋有机物，海洋，元素碳，碳酸盐和岩浆源的碳. 在本研究中，忽略岩浆源的碳，且人类作用也不在考虑之列，仅考虑前几个库之间的碳循环，模拟考虑以下两个过程:



(a) K/T边界天体撞击作用导致的生物绝灭

(died animals and plants caused by asteroid impact on K/T boundary)

(b) K/T边界天体撞击作用导致的森林大火和生物绝灭

(forest fire and died animals and plants on K/T boundary)

图3 对大气中 CO_2 的影响

Fig.3 The effect on carbon dioxide of atmosphere

(1)地球生物灭绝 50% 的效应：即陆地生物圈和海洋生物圈各有 50% 的碳转入无生命的陆地有机物和无生命的海洋有机物库中作为初始条件；

(2)森林大火和生物绝灭效应：地球生物灭绝 50%，且在陆地生物灭绝时有 50% 通过森林大火进入大气圈，无生命的陆地有机物也有 50% 进入大气圈(通过森林大火)，海洋生物 50% 灭绝进入无生命的海洋有机物中.

模拟结果示于图 3. 由图 3(a)，单纯的生物绝灭使大气圈中 CO_2 的含量相对正常含量低 1.5% 左右，这一效应持续时间可达 100 年左右. 森林大火和生物灭绝的联合作用影响大气圈中 CO_2 可达 100 年，但作用最强时，仅使大气圈中 CO_2 增加 67%(图 3(b))，考虑温室效应，按 CO_2 增加一倍，全球平均气温增加 2— 4 ℃ 计算，森林大火引起的温室效应相对于尘埃等产生的降温效应可忽略，虽然前者的持续时间长，但温度影响的幅度太小.

四、讨论和结果

在所研究的 6 次撞击事件中，前人仅对 K /T 边界的撞击事件进行过模拟[12,4]. 与前人的工作相比，本次工作所获得的 K /T 边界撞击作用的气候效应在温度变化幅度和持续时间上都明显比前者大，可能是由于本次工作利用了火山作用产生的尘埃在大气中传输的研究结果所致. 最近对古生物的研究[10]显示，如果 K /T 边界的古生物灭绝是由撞击作用导致的气候变化引起的，则这一变化须持续近十年之久，这一结论与本次研究所获得的气候变化持续 14 年十分吻合，表明本次工作所采用的模型是合理的.

本次研究表明，由撞击作用直接引起的气候效应可达几十年之久. 但从研究得较为详细的 K /T 界线，界线处粘土层厚约 10cm，按 1cm /ka 的沉积速率计算，持续时间为 1 万年左右，由氧同位素的异常确定的这一时期的古气候持续时间也在 1 万年左右. 这种差别可能是由于在模拟中没有考虑海洋作用，海洋由于其质量巨大是地表最大的储热库，对长期的气候效应不可忽略；另一方面，可能由于气候系统具有混沌性，撞击作用产生的气候效应改变了其初始条件，气候系统对这一变化响应而导致了持续时间更长的气候变化，因此，撞击作用只是诱因.

通过以上工作，可以得出如下几点结论：

1) 发生于新生代的 6 次撞击作用诱发了全球性的气候效应，这一效应是全球温度下降，然后回升至正常水平. 考虑到反照率随温度的变化，则这一温度效应最长可达 10^4 天之久，约 30 年. 如果考虑到海洋作用，可能降温幅度要小些，持续时间会更长. 撞击作用可能是产生古气候旋回的诱因.

2) 全球森林大火和生物绝灭会影响大气圈中 CO_2 的含量变化达 100 年之久，相对而言，CO_2 的含量变化最高仅达 67%，其温室效应作用较小，不足以抵消撞击尘埃产生的降温效应.

参 考 文 献

[1] 林贤超和李克让，大气科学，第17卷，第703页，1993.
[2] 欧阳自远和管云彬，科学通报，第9期，第829页，1992.
[3] 黄建平，理论气候模式，气象出版社，第184页，1991.
[4] Covey, C. et al., Global Catastrophes in Earth History (Ed. by V. L. Sharpton and P. D. Ward), Geological Society of American Special Paper, p. 247, p. 263, 1990.
[5] Cadel, R. D. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **81**, p. 3125, 1976.
[6] Clemens, W. A. and L. G. Nelms, *Geology*, Vol. **21**, p. 503, 1993.
[7] Hoffert, M. I. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **85**, p. 6667, 1980.
[8] Ivany, L. C. and R. J. Salawitch, *Geology*, Vol. **21**, p. 487, 1993.
[9] Lasaga, A. C. and R. J. Kirkptrick, Kinetics of Geochemical process, Mineralogical Society of American, p 69, 1981.
[10] Morell, V., *Sciences*, Vol. **261**, p. 1518, 1993.
[11] Robock, A., *J. Volcano and Geothermal Res:*, Vol. **11**, p, 67, 1981.
[12] Toon, O. B. et al., Geological implications of impacts of large asteroids and commets on the Earth (Ed. by Silver, L. T. and P. H. Schultz), p. 187, 1982.
[13] Turco, R. P. et al., *Sciences*, Vol. **247**, p. 166, 1990,
[14] Turco, R. P. et al., *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. **19**, p. 383, 1991.

THE EFFECT OF ASTEROID IMPACTS IN CENOZOIC ON PALEOCLIMATE AND CARBON CYCLE

Xiao Zhi-feng Ouyang Zi-yuan Lin Wen-zhu
(*Institute of Geochemistry, Academia Sinica, Guiyang* 550002)

Abstract

The paleoclimate effects of six asteroid impact events on the Earth happened in Cenozoic are studied by employing a energy-balance model. The result shows that when the dusts produced by these impacts entered the stratosphere, the average temperature of the Earth decrease to below 0 ℃ , the disturbances caused by the impacts on temperature are last for about 30 years in maximum. It is first time that greenhouse effect of the carbon dioxide produced by global fire and decomposition the died animals and plants is considered in modeling. However, at maximum, carbon dioxide produced by these two effects (global fire and decomposition of the died animals and plants) only makes an increase of 67% the atmospheric carbon dioxide, the greenhouse effect is so small that it can be negleted while compared with the effect of the antigreenhouse effect of the dusts. When the global carbon cycle is considered, these two effects on atmospheric carbon dioxide are last for 100 years.

Key words Impacts, Climate simulation, Forest fire, Global carbon cycle