

生物灭绝、地球自转与周期性陨击事件

陈道汉 刘麟仲 郑家庆

(中国科学院紫金山天文台,南京)

摘 要

本文讨论地质史上周期性陨击事件与生物灭绝以及地球自转长期变化的关系,求得古生物灭绝强度 E 与陨击坑直径 D 之间的统计关系为 $E = a + b \log D$. 以 E 做权重作时间序列分析,得到陨击周期为 27.8 百万年. 文中还分析了一亿年以内的古生物钟资料,在消除了地月系潮汐演化趋势后,得到地球自转长期变化的周期约为 30 百万年. 两个时间序列的最大互相关系数为 0.43. 这表明,陨击事件是造成地球自转长期变化的原因.

一、引 言

1984 年, Raup 和 Sepkoski 在分析了过去 250 百万年间的生物大规模灭绝资料以后发现: 生物灭绝有 12 个峰值, 相互间隔为 26 百万年. 鉴于地球上找不出这一生物灭绝模式的原因, 他们提出了地球外起因^[1]. 相似地, Rampino 和 Stothers 在重新分析了 Raup 和 Sepkoski 资料后, 得到生物灭绝的周期约为 30 百万年^[2].

另一些科学家则寻求陨击事件的周期性. Alvarez 和 Muller 将大陨击坑记录视为一个时间序列, 分析出陨击事件具有 28.4 百万年周期^[3].

将这两类独立的地质记录联系在一起的是诺贝尔奖金获得者 Alvarez 及其合作者的工作. 他们在关于地球上白垩纪—三迭纪界面的铀含量异常的研究中提出, 地外天体的碰撞既是铀含量异常也是生物灭绝的原因^[4]. 他们的这一碰撞灭绝假设导致了现今流行的彗星灾变论以及种种触发机制的思考^[2,5-7].

在本文中, 我们也讨论陨击事件与生物灭绝的关系并寻求陨击事件与地球自转变化的相关.

二、生物灭绝强度与陨击坑

我们分析了地质史上过去 250 百万年以内的生物灭绝强度 E 和陨击坑直径 D 间的关系, 陨击坑资料取自文献[3](表 1), 生物灭绝资料取自文献[1].

在分析 E 和 D 的关系时, 我们采用两个工作假设: (1) 在处理陨击坑年龄与生物灭绝年代之间的匹配时, 计及标准偏离后的陨击坑年龄与灭绝年代之差不得超过地层阶的平均持续期

表 1 陨击坑资料

陨击坑编号	陨击坑直径 $D(\text{km})$	陨击坑年龄 (百万年)	陨击坑编号	陨击坑直径 $D(\text{km})$	陨击坑年龄 (百万年)
43	10	7 ± 4	18	25	100 ± 5
35	20	13 ± 11	52	17	100 ± 20
73	24	14.8 ± 0.7	56	5	119 ± 2
60	28	38 ± 4	33	22	133 ± 6
99	8.5	37 ± 2	74	23	160 ± 5
69	100	39 ± 9	65	15	185 ± 10
50	14	78 ± 2	70	80	183 ± 3
87	25	95 ± 7	54	70	214 ± 3

表 2 陨击坑与生物灭绝间的年代匹配

陨击坑编号	陨击坑直径 $D(\text{km})$	陨击坑年龄 (百万年)	灭绝强度 $E(\%)$	灭绝年代 (百万年)
73	24	14.8 ± 0.7	28	11.3(11)
69	100	39 ± 9	46	38(37)
87	25	95 ± 7	20	91(91)
52	17	100 ± 20	9	125
33	22	133 ± 6	20.5	144(144)
74	23	160 ± 5	7.5	163
65	15	185 ± 10	11	175(176)
54	70	214 ± 3	40	219(217)

—— 6.2×10^6 年; (2) 在满足工作假设(1)的陨击坑中, 只录用具有最大 D 值者。

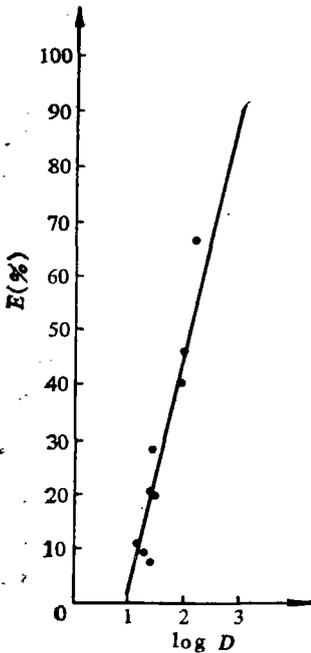


图 1 生物灭绝强度 $E(\%)$ 与 $\log D$ 线性相关

借助于这两个工作假设, 我们就可以从表 1 中剔除陨击坑编号为 43, 35, 60, 99, 50, 18, 56, 70 的资料而得到表 2。其中 E 值是从文献 [1] 的图 1 量度得到, 实为生物灭绝的百分率。表 2 中最后一列为观测到灭绝高峰的地质年代, 取自文献 [1], 括号内数据则取自文献 [2]。

经回归分析, 得线性相关关系式

$$E = a + b \log D, \quad (1)$$

其中 $a = -43.04, b = 44.85$ 。又相关系数 $r = 0.92$ 。

三、作为时间序列的陨击坑记录 及其功率谱分析

Alvarez 和 Muller 在他们的论文中讨论了地质年龄在 250 百万年以内的大陨击坑记录, 得到的结论是: 大多数陨击坑的出现以 28.4 百万年为周期。在他们的分析中, 每个陨击坑均以等价高斯曲线表示, 高斯分布的标准离差 σ 是用每个陨击坑组的年代误差。

关系式 (1) 意味着 $a + b \log D$ 可以被援引为表征陨击坑对生物灭绝作用的实际效果的

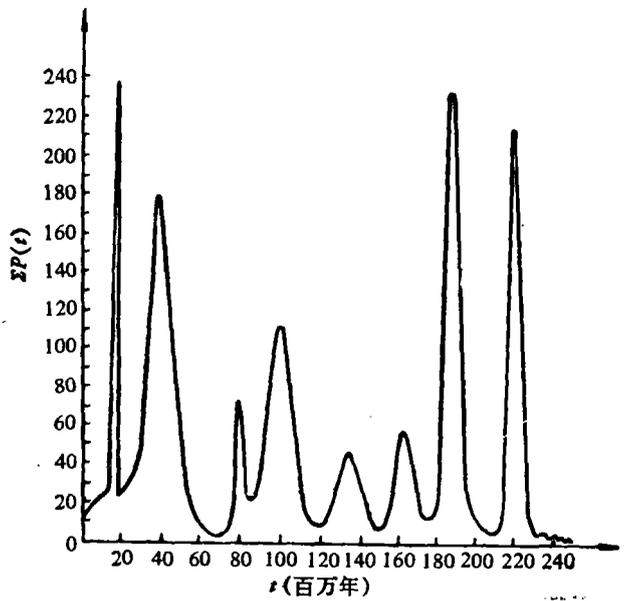


图 2 按(2)式表出的地球陨击坑记录

特征量。为此,我们以 $a + b \log D$ 为权重,将每个陨击坑记录表示为下列形式的加权高斯分析:

$$p(t) = \frac{a + b \log D}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(t - \bar{t})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (2)$$

式中 \bar{t} 为陨击坑的年龄,以这样的方式表示的陨击坑记录是一个由图 2 代表的时间序列。它实际上是个关于特征量的时间序列,其功率谱由图 3 表示。图中的纵坐标为 $a_k^2 + b_k^2$ (a_k, b_k 是时间序列的 Fourier 系数),横坐标为 K, K 对应的周期 $T = \frac{250}{K}$ (百万年)。

分析表明,卓越周期为 27.8 百万年。我们认为这样求得的周期更能反映陨击事件——生物灭绝这一链索的实质。它是扰乱地球生物系统的地球外因素的周期。

四、导致恐龙灭绝的陨击事件

6500 万年以前,白垩纪—第三纪之交,地球上 70% 的物种永远消失了,这是地球上有史以来最大和最著名的生物灭绝事件。恐龙显然

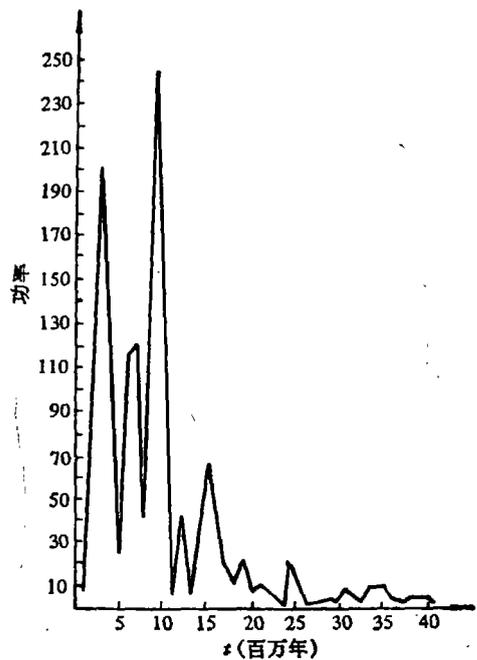


图 3 图 2 的 Fourier 功率谱,峰值位于 $K = 9$,对应于周期 27.8 百万年

是那次事件的牺牲品。可是,科学家对导致这一事件的陨击坑记录颇有争议。Alvarez 根据铍含量异常在地球表面的分布提出:位于葡萄牙 Tagus 的直径约 300km 的陨击坑更可能是对恐龙灭绝负责的陨击记录^[8]。

根据我们求得的关系式(1),取 $E = 70$, 得到 $D \approx 330\text{km}$ 。这就是说,我们的分析支持 Alvarez 的观点。

我们曾在作功率谱分析时加上虚拟坑资料: 陨击年代为 65 ± 5 百万年, 直径 $D = 330\text{km}$ 。结果得卓越周期仍为 27.8 百万年。

五、从古生物钟资料导出的地球自转长期变化

通过分析瓣鳃类、珊瑚等古生物化石,可以获知地球的古转动。这些有机构造物的生长节律能反映三个天文周期:

- (1) 每一年中的太阳日数 N_1 。
- (2) 每一朔望月中的太阳日数 N_2 。
- (3) 每一年中的朔望月数 N_3 。

通常,在过去的文献中,只是将由古生物钟资料给出的 N_1 与 t 的关系以及 N_2 与 t 的关系画在图上,求出它们的不加权最佳拟合直线,并视之为地-月系潮汐演化的趋势线。在这些处理中,测量值对趋势线的偏离被解释为随机的测量误差而不予理会^[9,10]。

我们认为,这些偏离在相当大的程度上反映着地球古转动的真实改变,引起这些改变的原因是因为有地球外天体的撞击。

表 3 给出了古生物钟资料及它们的来源。我们用两种方式求得了两条地月系潮汐演化趋势线。一条是依靠线性回归分析得到的回归趋势线,另一条是根据天文观测和记录结果外推而得到的天文趋势线(图 4)。

表 3 古生物钟资料

t (百万年前)	N_2	文 献	t (百万年前)	N_2	文 献
0	29.22	[11]	100	29.76	[12]
1	29.48	[12]	160	29.80	[12]
4	29.66	[12]	220	29.66	[11]
10	29.52	[11]	230	29.82	[12]
14	29.40	[11]	290	30.16	[11]
17	29.43	[11]	300	30.20	[11]
27	29.22	[11]	310	30.18	[12]
30	29.64	[12]	330	30.22	[11]
35	29.63	[11]	340	30.37	[11]
38	29.80	[11]	350	30.40	[11]
45	29.91	[11]	360	30.53	[11]
48	29.74	[12]	370	30.50	[12]
50	29.41	[11]	420	29.84	[11]
54	29.60	[11]	445	30.30	[11]
58	29.96	[11]	470	30.70	[11]
60	29.64	[12]	510	31.56	[13]
70	29.85	[11]			

1. 回归趋势线(等权近似) 根据表 3 所载数据作线性回归,得回归方程 $\tilde{N}_2 = 0.00249t + 29.48$. 相应的相关系数 $r = 0.85$. 去掉 95% 置信区间以外的两点(420, 29.84)和(510, 31.56)以后,再作一次回归,就得到我们所需的回归趋势线

$$\tilde{N}_2 = 0.00233t + 29.50, \tag{3}$$

其相关系数达 0.90.

2. 天文趋势线 望远镜观测和古代日食记录指明,地球自转以大约 $5 \times 10^{-22} \text{rad/s}$ 的速率减慢. 也就是说,日长按 1.5ms/世纪 的速率增加. 古生物证据还认为,这一加速度已经保持了大约 5 亿年^[14].

天文趋势线可以根据下列公式计算:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= \dot{\Omega}(t)/n_{\odot}, \\ \frac{N_2}{N_1} &= \frac{n_{\odot}}{n_{\text{L}}(t) - n_{\odot}}, \\ n_{\text{L}}(t) &= n_{\text{L}}(t_0) + \dot{n}_{\text{L}}t, \quad (t \text{ 取负值}) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中 n_{\odot} 和 n_{L} 分别表示太阳和月球的平均运动,地球的加速度 $\dot{\Omega}(t) = -5.5 \times 10^{-22} \text{rad/s}^2$ 以及 $\dot{n}_{\text{L}} = -1.35 \times 10^{-23} \text{rad/s}^2$ 取自文献[14].

计算结果得到天文趋势线方程为

$$\tilde{N}_2 = 0.0017t + 29.53. \tag{5}$$

量 $N_2 - \tilde{N}_2$ 乃是扣除了地月系潮汐演化的地球自转变化,因而它反映了地球外天体撞击所引起的部分.

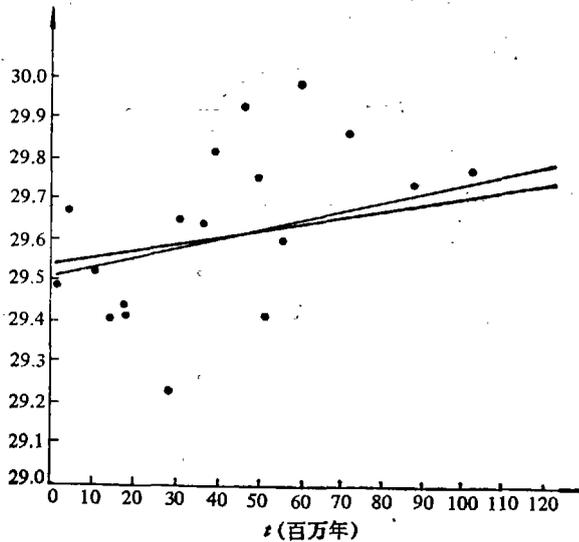


图 4 $N_2(t)$ 资料($t \leq 100$ 百万年)以及地月系潮汐演化趋势线

我们用功率谱方法分析了时间序列 $F(t) = N_2 - \tilde{N}_2$ 和 $G(t) = |N_2 - \tilde{N}_2|$. 由于可用的古生物资料缺乏,我们只援引 $t \leq 100$ 百万年的古生物资料. 当用回归趋势线为基准时,求得 $F(t)$ 的卓越周期为 33 百万年, $G(t)$ 的卓越周期为 25 百万年;若以天文趋势线为基准,得

到 $F(t)$ 和 $G(t)$ 的卓越周期分别与回归趋势线为基准的情况一样。

这些周期反映了在地质年代中叠加在潮汐演化上的地球自转长期变化。

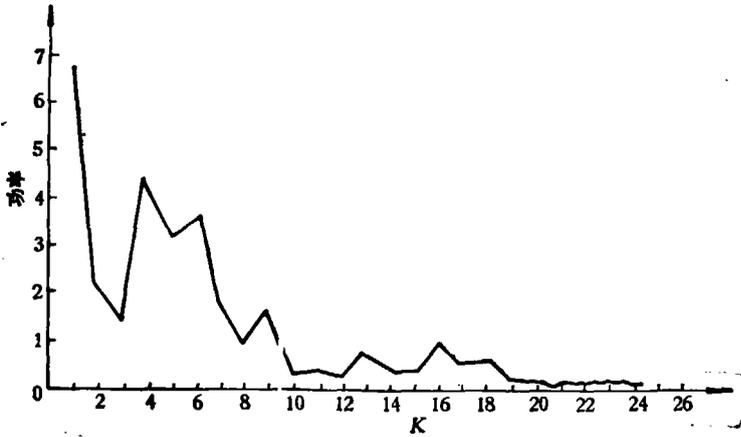


图 5 以回归趋势线为基准时的 $G(t)$ 功率谱

六、陨击坑记录与地球自转变化

我们作古生物钟 (地球的古转动) 资料与地球陨击坑记录这两个时间序列之间的互相关, 以求获取两者之间因果关系的信息。

我们感兴趣的不是起伏的相对振幅, 而是一个序列相对于另一个序列的滞后时间。所以两个序列都用其标准偏离为单位表出, 以便使得周期性起伏的大小相近。以地球自转资料 (古生物钟) 为例, 处理过程如下: 首先采用作过趋势线校正后的相对偏离作为“校正”序列

$$x = x(t) \equiv \frac{|N_2 - \tilde{N}_2|}{\tilde{N}_2}, \quad (6)$$

然后以标准偏离 $SD = \sqrt{\frac{1}{n}(x_i - \bar{x})^2}$ 为单位, 将序列 $x(t)$ 化为序列 $x'(t)$

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{SD}. \quad (7)$$

相似地, 从陨击坑记录 $y = y(t) \equiv D(t)$ ($us \log D$ 为权重), 可用相同过程求得相应的 y'_i 。应当指出的是 x'_i 和 y'_i 的相应 t 值必须保持一致。

最后, 两时间序列的互相关系数

$$R(\tau) = \frac{\sum x'_i y'_{i+\tau}}{n}. \quad (8)$$

图 6(a) 和 6(b) 为计算结果, 对应于极大相关的滞后时间 τ_{\max} 和最大互相关系数取值如下:

以回归趋势线为标准 $\tau_{\max} = 10$ 百万年, $R_{\max} = 0.43$,

以天文趋势线为标准 $\tau_{\max} = 10$ 百万年, $R_{\max} = 0.38$ 。

若在陨击坑记录中加上前述虚拟坑, 则 R_{\max} 稍增而 τ_{\max} 变为 9 百万年。这就是说, 无论用那条趋势线作计算, 古转动序列相对于陨击事件序列的时间滞后达到 10^7 年量级。实际

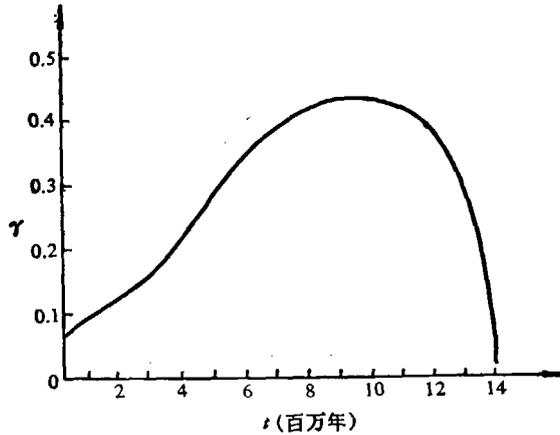


图 6(a) 陨击坑记录与地球古转动间的互相关
(以回归趋势线为依据)

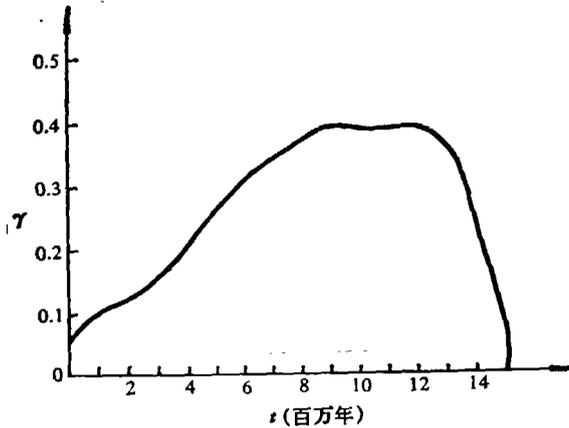


图 6(b) 陨击坑记录与地球古转动间的互相关
(以天文趋势线为依据)

上,在地球受到地外天体的巨大撞击后,即行发生巨大的火山爆发等地质灾变。不仅地壳构造发生巨变,连地幔物质的对流情况也会随之发生变动,从而导致地核-地幔间耦合情况发生改变,地球内部物质发生重新分布以及内部均衡性重新调整等,10⁷年量级的时间滞后用于所有这些过程。

参 考 文 献

- [1] Raup, D. M. and Sepkoski, J. J., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 81(1984), 801.
- [2] Rampino, M. R. and Stothers, R. B., *Nature*, 308(1984), 709.
- [3] Alvarez, W. and Muller, R. A., *ibid.*, 308(1984), 718.
- [4] Alvarez, L. W. et al., *Science*, 208(1980), 1095; Alvarez, W. et al., *ibid.*, 216(1982), 886.
- [5] Davis, M., Hut, P. and Muller, R. A., *Nature*, 308(1984), 715.
- [6] Whitmire, D. P. and Jackson, A. A., *ibid.*, 713.
- [7] Schwartz, R. D. and James, P. B., *ibid.*, 712.
- [8] Alvarez, L. W., in *Geological Implications of Impacts of Large Asteroids and Comets on the Earth* (Eds. Silver, L. T. and Schultz, P. H.), i. e. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, V. 190, 1982.

- [9] Lambeck, K., in *Tidal Friction and the Earth's Rotation* (Eds. Brosche, P. and Sündermann, J.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1978, 145—153.
- [10] Scrutton, C. T., *ibid.*, 154—196.
- [11] Pannella, G., *Astrophysics and Space Sci.*, 16(1972), 221.
- [12] Berry, W. B. N. and Barker, R. M. in *Growth Rhythms and the History of the Earth's Rotation* (Eds. Rosenberg, G. D. and Runcorn, S. K.), London, John Wiley, 1975, 9—24.
- [13] McGugan, A., in *Abstr. Ann. Meeting Geol. Soc. Amer.*, V. 145, 1967.
- [14] Lambeck, K., in *The Earth, Its Origin, Structure and Evolution* (Ed. McElninny, M. W.), 1979, Academic Press, London, 59—82.