

# The Energy of an Asteroid Hitting the Earth

Chaoqiong He<sup>1,2</sup>, Jianpo Guo<sup>1,2</sup>, Rongqin Cang<sup>1,2</sup>, Juanxiu Hu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Science and Technology, Puer University, Puer Yunnan

<sup>2</sup>Open Key Laboratory of Mechanics in Yunnan Province, Puer Yunnan

Email: guojianpo1982@hotmail.com

Received: Jun. 24<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jul. 16<sup>th</sup>, 2016; published: Jul. 19<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

An asteroid hitting the Earth may cause the extinction of dinosaurs, 65 million years ago. The research aim of this paper is how the energy of the asteroid hitting the Earth can be depending on the chosen of the aphelion distance and the perihelion distance, while the mass of the asteroid is fixed. The adopted aphelion distance of the asteroid is 1.90, 2.15, 2.65, 3.25, 3.95 and 5.2075 AU, respectively. The adopted perihelion distance of the asteroid is 1.0009, 0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55 and 0.50 AU, respectively. Our calculated results show that the larger the aphelion distance of the asteroid is, the larger the energy of its hitting the Earth is; the smaller the perihelion distance of the asteroid is, the larger the energy of its hitting the Earth is; the minimum kinetic energy of the asteroid hitting the earth is  $1.0725 \times 10^{23}$  J, and the maximum kinetic energy is  $5.8280 \times 10^{23}$  J.

## Keywords

Asteroids, Earth, Solar System

# 小行星撞击地球的能量

何超琼<sup>1,2</sup>, 郭建坡<sup>1,2</sup>, 仓荣琴<sup>1,2</sup>, 胡娟秀<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>普洱学院理工学院, 云南 普洱

<sup>2</sup>云南省高校力学开放重点实验室, 云南 普洱

Email: guojianpo1982@hotmail.com

收稿日期: 2016年6月24日; 录用日期: 2016年7月16日; 发布日期: 2016年7月19日

## 摘要

小行星撞击地球可能导致了6500万年前恐龙灭绝。本文的研究目标是：在质量一定的情况下，小行星的远日点距离和近日点距离的差异，究竟会在多大程度上影响小行星撞击地球的能量。我们采用的小行星的远日点距离分别为1.90、2.15、2.65、3.25、3.50、3.95和5.2075AU，近日点距离分别为1.0009、0.95、0.90、0.85、0.80、0.75、0.70、0.65、0.60、0.55和0.50AU。我们的计算结果表明：小行星的远日点距离越大，撞击地球的能量越大；小行星的近日点距离越小，撞击地球的能量越大；小行星撞击地球的最小动能为 $1.0725 \times 10^{23}$  J，最大动能为 $5.8280 \times 10^{23}$  J。

## 关键词

小行星，地球，太阳系

## 1. 引言

小行星主要位于火星和木星轨道之间，小行星主带的半长轴范围为 2.1~3.3 AU；小行星主带又分三部分：内主带、中央主带和外主带，半长轴范围分别为 2.1~2.5 AU、2.5~2.8 AU 和 2.8~3.3 AU。除了主带之外，其它几个区域也分布着一些小行星：轨道半长轴为 1.75~2.05 AU 的小行星称为 Hungaria 小行星，轨道半长轴为 3.3~3.5 AU 的小行星称为 Cybele 小行星，轨道半长轴约为 4 AU 的小行星称为 Hilda 小行星，轨道半长轴约等于木星轨道半长轴的小行星称为 Trojan 小行星[1]。

已经观测到并且编号的小行星有 383,000 颗，已经观测到尚未编号的小行星还有 260,000 颗[2]。直径超过 500 千米的小行星有 3 颗，分别是谷神星、灶神星和智神星，直径分别为 945、519 和 514 千米[3]-[6]。以前，天文学界都认为谷神星是最大的小行星，可是 2006 年国际天文学联合会通过决议把谷神星升级为矮行星；所以现在灶神星被称为最大的小行星，而 Fernández et al. (2015) 给出的灶神星的直径为 560 千米[2]。直径大于 10 千米的小行星大约有 1000 颗，直径大于 100 千米的小行星大约有 100 颗[7]。小行星虽然数量众多，可是由于体积小，所以它们的总质量却小于地球质量的千分之一[8]，仅为地球质量的万分之六[9]。

小行星的化学成分和密度差异较大，大多数小行星是一些形状很不规则、表面粗糙结构松散的硅酸盐石块，密度约为  $2.5-3.2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；具有挥发性的小行星的密度约为  $1.0-2.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [2] [10]，石-铁结构的小行星的密度约为  $4.0-5.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [10]，而铁结构小行星的密度可以超过  $7.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [6] [11]。大多数小行星的都存在自转，体积较大的小行星自转周期较长，自转周期一般大于 2.4 小时；而体积较小的小行星自转周期较短，某些体积特别小的小行星的自转周期只有 30 秒[12]。有些小行星还拥有自己的卫星，或者是两颗小行星组成双星系统[13]-[15]。小行星在椭圆轨道上绕日公转，如果一颗小行星的近日点距离小于 1.3 AU，就被称为近地小行星，有可能撞击地球[2]。

小行星的质量虽然不大，但是小行星撞击地球产生的影响却很大。2013 年 2 月 15 日，一颗直径 13.7 米的小行星在俄罗斯车里雅宾斯克州上空爆炸，造成上千人受伤。1908 年，一颗直径 40 米的小行星在俄罗斯西伯利亚通古斯上空爆炸，毁坏了 2000 平方公里的森林[16]。目前，关于恐龙灭绝的主流理论就是在 6500 万年前，一颗直径约为 10 千米的小行星撞击到北美洲尤坦卡半岛的浅海海域，恐龙适应不了环境巨变，在撞击后很短的时间内就全部灭绝了[2] [17]。小行星撞击地球的能量越大，引发环境巨变的能力越大，引起生物灭绝的能力也就越大。小行星质量越大，撞击能量也就越大，这是显而易见的。而

小行星撞击地球时的速率差异，也会影响撞击能量。本文主要研究小行星远日点距离和近日点距离的差异，将会在多大程度上影响灭绝恐龙的那颗小行星撞击地球的能量。

## 2. 计算方法

### 2.1. 小行星撞击地球过程中的几个近似假设

小行星撞击地球的过程比较复杂，我们作以下几个假设。小行星原来在正圆轨道上绕日公转，由于受到某种扰动或者作用力的影响(究竟这种扰动或者作用力是怎样产生的，本文不做探讨)，小行星的公转轨道变成椭圆，并与地球公转轨道有交叉点。小行星椭圆轨道远日点距离就是小行星原来的轨道半径，近日点距离小于或者等于日地距离。地球公转轨道的椭率很小，近似认为地球的公转轨道是正圆，而且不考虑地球自转。小行星在撞击地球的过程中，不考虑空气摩擦。

本文的主要目标是分别探讨小行星公转轨道的远日点距离和近日点距离的不同，对小行星撞击地球时的动能的影响。尽管小行星的直径、形状和密度有所差异，可是为了减少变量，小行星都近似看成直径相同的球体，密度也都采用相同的数值。根据直径和密度，就可求出小行星的质量：

$$m = \frac{1}{6}\pi D^3 \rho \quad (1)$$

### 2.2. 轨道相切

小行星轨道在黄道面上，远日点距离为 $r_2$ ，近日点距离等于地球的公转半径，即 $r_1 = r_{\oplus}$ ；则小行星可能会在近日点被地球捕获，并最终撞击地球，如图1所示。在本文中，日地距离采用 Allen (1973)的数据，即 $r_{\oplus}$ 等于 1.0009 AU [18]。小行星绕太阳公转，受到太阳的引力是有心力，小行星的轨道角动量守恒；而且在近日点和远日点，小行星的公转速度方向与矢径方向垂直，必有：

$$L = r_1 m v_1 = r_2 m v_2 \quad (2)$$

小行星受到太阳的引力也是保守力，机械能守恒：

$$\frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{GM_{\odot} m}{r_1} = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{GM_{\odot} m}{r_2} \quad (3)$$

联立(2)、(3)二式，可得：

$$v_1 = \sqrt{\frac{2GM_{\odot} r_2}{(r_1 + r_2) r_1}} \quad (4)$$

小行星在近日点的速度为 $\mathbf{v}_1 = v_1 \mathbf{e}_{\theta}$ ，地球的公转速度 $\mathbf{v}_{\oplus} = v_{\oplus} \mathbf{e}_{\theta}$ ，而且 $r_1 = r_{\oplus}$ 。所以，小行星刚被地球引力捕获时，相对于地球的速度为：

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_{\oplus} = \left[ \sqrt{\frac{2GM_{\odot} r_2}{(r_{\oplus} + r_2) r_{\oplus}}} - \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r_{\oplus}}} \right] \mathbf{e}_{\theta} \quad (5)$$

小行星在撞向地球的过程中，只有地球引力做功，机械能守恒：

$$\frac{1}{2} m \Delta v^2 = \frac{1}{2} m v_{hit}^2 - \frac{GM_{\oplus} m}{R_{\oplus}}$$

整理该式，可以求出小行星撞击地面时相对于地球的速率：

$$v_{hit} = \sqrt{\Delta v^2 + \frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \quad (6)$$

最后可以求出小行星撞击地面时的动能：

$$E_k = \frac{1}{2}mv_{hit}^2 \quad (7)$$

### 2.3. 轨道穿插

小行星轨道在黄道面上，远日点的距离为  $r_2$ ，近日点的距离小于地球的公转半径，即  $r_1 < r_{\oplus}$ ；则小行星的椭圆轨道和地球的正圆轨道有两个交叉点，小行星可能会在交叉点被地球捕获，并最终撞击地球，如图 2 所示。根据小行星轨道的  $r_1$  和  $r_2$ ，可以求出轨道半长轴  $a$  和椭率  $e$ ：

$$a = \frac{r_1 + r_2}{2}, \quad e = \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2} \quad (8)$$

椭圆轨道的机械能和角动量分别为：

$$E = -\frac{GM_{\odot}m}{2a}, \quad L = m\sqrt{GM_{\odot}a(1-e^2)} \quad (9)$$

根据机械能守恒定律，小行星在轨道交叉点的公转速率满足：

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_{\odot}m}{r_{\oplus}} = -\frac{GM_{\odot}m}{2a}$$

整理可得：

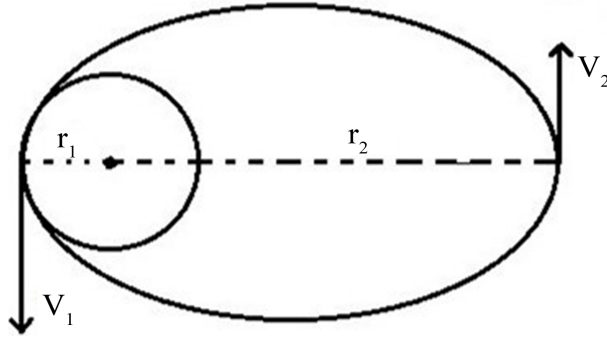


Figure 1. The diagram that an asteroid's orbit is tangential to the Earth's orbit  
图 1. 小行星轨道和地球轨道相切的示意图

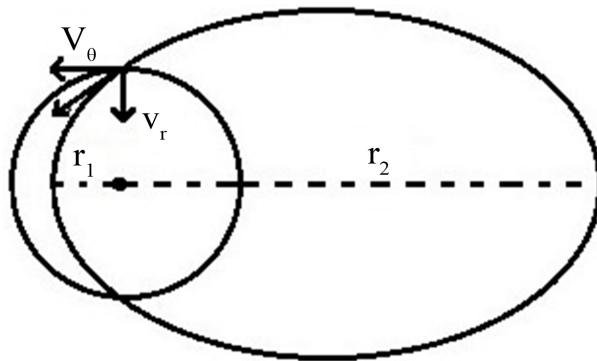


Figure 2. The diagram that an asteroid's orbit crosses the Earth's orbit  
图 2. 小行星轨道和地球轨道互相穿插的示意图

$$v = \sqrt{\frac{2GM_{\odot}}{r_{\oplus}} - \frac{GM_{\odot}}{a}} \quad (10)$$

小行星在轨道交叉点的公转横向速率满足：

$$v_{\theta} = \frac{L}{r_{\oplus} m} = \frac{\sqrt{GM_{\odot} a (1-e^2)}}{r_{\oplus}} \quad (11)$$

进而可以求出小行星在轨道交叉点的公转径向速率：

$$v_r = \sqrt{v^2 - v_{\theta}^2} \quad (12)$$

小行星刚被地球捕获时，相对于地球的速度和速率分别为：

$$\Delta \mathbf{v} = (v_{\theta} \mathbf{e}_{\theta} - v_r \mathbf{e}_r) - v_{\oplus} \mathbf{e}_{\theta} = (v_{\theta} - v_{\oplus}) \mathbf{e}_{\theta} - v_r \mathbf{e}_r, \quad \Delta v = \sqrt{(v_{\theta} - v_{\oplus})^2 + v_r^2} \quad (13)$$

然后根据(6)、(7)式，可以求出小行星撞击地面时的动能。

## 2.4. 撞击升温

小行星的比热为  $C$ ，如果小行星撞击地球的动能全部转化成自身的内能，根据能量守恒定律，可以求出自身升高的温度  $\Delta t$ ：

$$\Delta t = \frac{E_k}{mC} \quad (14)$$

## 3. 计算结果

### 3.1. 小行星的质量

6500 万年前，灭绝恐龙的那颗小行星的直径约为 10 千米 [17]；大多数小行星的密度为  $2.5 - 3.2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [2] [10]，在本文中我们采用中间值  $2.85 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据公式(1)，可以求出灭绝恐龙的那颗小行星的质量为  $1.4923 \times 10^{15} \text{ kg}$ 。

### 3.2. 小行星刚被地球捕获时的绝对速率

关于小行星的远日点距离  $r_2$ ，在本文中我们采用 7 组数据，分别是 Hungarla 小行星的平均轨道半长轴 1.90AU，小行星主带的内边界 2.15 AU，小行星主带的中间值 2.65 AU，小行星主带的外边界 3.25 AU，Cybele 小行星的平均轨道半长轴 3.50 AU，Hilda 小行星的平均轨道半长轴 3.95 AU，Trojan 小行星的平均轨道半长轴等于木星的轨道半长轴 [1]。Allen (1973) 给出的木星轨道半长轴为 5.2075 AU [18]，所以在本文中 Trojan 小行星的平均轨道半长轴采用 5.2075 AU。小行星的近日点距离  $r_1$  分别采用 1.0009、0.95、0.90、0.85、0.80、0.75、0.70、0.65、0.60、0.55 和 0.50 AU； $r_1$  等于日地距离对应的是轨道相切的情况，而  $r_1$  小于日地距离对应的是轨道穿插相切的情况。根据公式(4)和(10)可以求出小行星刚被地球捕获时的绝对速率(小行星相对于太阳的速率)，详见表 1。通过公式(4)、(8)、(10)可以推出： $r_2$  越大，小行星刚被地球捕获时的绝对速率越大； $r_1$  越大，小行星刚被地球捕获时的绝对速率也越大。我们的计算结果也给出了相同的结论，详见表 1。

### 3.3. 小行星刚被地球捕获时的相对速率

根据公式(5)和(13)可以求出小行星刚被地球捕获时的相对速率(小行星相对于地球的速率)，详见表 2。 $r_2$  越大，小行星的机械能越大； $r_2$  越大，轨道越扁，它被地球捕获时，自身运动方向与地球运动方向的

**Table 1.** The absolute velocity of an asteroid, when it is just captured by the Earth. The velocity is in unit of m/s  
**表 1.** 小行星刚被地球捕获时的绝对速率, 单位是 m/s

| 近日点距离 (AU) | 1.9000     | 2.1500     | 远日点距离 2.6500 | (AU) 3.2500 | 3.5000     | 3.9500     | 5.2075     |
|------------|------------|------------|--------------|-------------|------------|------------|------------|
| 1.0009     | 3.4079E+04 | 3.4784E+04 | 3.5876E+04   | 3.6820E+04  | 3.7133E+04 | 3.7613E+04 | 3.8566E+04 |
| 0.9500     | 3.3919E+04 | 3.4651E+04 | 3.5780E+04   | 3.6751E+04  | 3.7073E+04 | 3.7563E+04 | 3.8535E+04 |
| 0.9000     | 3.3754E+04 | 3.4515E+04 | 3.5683E+04   | 3.6682E+04  | 3.7012E+04 | 3.7514E+04 | 3.8505E+04 |
| 0.8500     | 3.3583E+04 | 3.4375E+04 | 3.5583E+04   | 3.6611E+04  | 3.6949E+04 | 3.7463E+04 | 3.8474E+04 |
| 0.8000     | 3.3405E+04 | 3.4228E+04 | 3.5479E+04   | 3.6538E+04  | 3.6885E+04 | 3.7411E+04 | 3.8442E+04 |
| 0.7500     | 3.3219E+04 | 3.4077E+04 | 3.5372E+04   | 3.6463E+04  | 3.6819E+04 | 3.7358E+04 | 3.8410E+04 |
| 0.7000     | 3.3024E+04 | 3.3919E+04 | 3.5262E+04   | 3.6385E+04  | 3.6751E+04 | 3.7303E+04 | 3.8377E+04 |
| 0.6500     | 3.2821E+04 | 3.3754E+04 | 3.5148E+04   | 3.6306E+04  | 3.6682E+04 | 3.7248E+04 | 3.8343E+04 |
| 0.6000     | 3.2608E+04 | 3.3583E+04 | 3.5030E+04   | 3.6225E+04  | 3.6611E+04 | 3.7191E+04 | 3.8309E+04 |
| 0.5500     | 3.2385E+04 | 3.3405E+04 | 3.4908E+04   | 3.6141E+04  | 3.6538E+04 | 3.7132E+04 | 3.8275E+04 |
| 0.5000     | 3.2151E+04 | 3.3219E+04 | 3.4782E+04   | 3.6055E+04  | 3.6463E+04 | 3.7073E+04 | 3.8239E+04 |

**Table 2.** The relative velocity of an asteroid, when it is just captured by the Earth. The velocity is in unit of m/s  
**表 2.** 小行星刚被地球捕获时的相对速率, 单位是 m/s

| 近日点距离 (AU) | 1.9000     | 2.1500     | 远日点距离 2.6500 | (AU) 3.2500 | 3.5000     | 3.9500     | 5.2075     |
|------------|------------|------------|--------------|-------------|------------|------------|------------|
| 1.0009     | 4.3035E+03 | 5.0084E+03 | 6.1001E+03   | 7.0440E+03  | 7.3576E+03 | 7.8371E+03 | 8.7903E+03 |
| 0.9500     | 6.5033E+03 | 7.2590E+03 | 8.4088E+03   | 9.3880E+03  | 9.7108E+03 | 1.0202E+04 | 1.1173E+04 |
| 0.9000     | 8.1925E+03 | 9.0226E+03 | 1.0264E+04   | 1.1305E+04  | 1.1645E+04 | 1.2161E+04 | 1.3171E+04 |
| 0.8500     | 9.6724E+03 | 1.0576E+04 | 1.1912E+04   | 1.3017E+04  | 1.3376E+04 | 1.3918E+04 | 1.4971E+04 |
| 0.8000     | 1.1035E+04 | 1.2009E+04 | 1.3435E+04   | 1.4603E+04  | 1.4980E+04 | 1.5547E+04 | 1.6645E+04 |
| 0.7500     | 1.2329E+04 | 1.3369E+04 | 1.4879E+04   | 1.6107E+04  | 1.6501E+04 | 1.7093E+04 | 1.8232E+04 |
| 0.7000     | 1.3581E+04 | 1.4683E+04 | 1.6273E+04   | 1.7556E+04  | 1.7967E+04 | 1.8582E+04 | 1.9759E+04 |
| 0.6500     | 1.4813E+04 | 1.5973E+04 | 1.7637E+04   | 1.8972E+04  | 1.9398E+04 | 2.0034E+04 | 2.1246E+04 |
| 0.6000     | 1.6039E+04 | 1.7253E+04 | 1.8987E+04   | 2.0370E+04  | 2.0810E+04 | 2.1464E+04 | 2.2708E+04 |
| 0.5500     | 1.7274E+04 | 1.8538E+04 | 2.0336E+04   | 2.1763E+04  | 2.2215E+04 | 2.2887E+04 | 2.4159E+04 |
| 0.5000     | 1.8528E+04 | 1.9840E+04 | 2.1696E+04   | 2.3163E+04  | 2.3626E+04 | 2.4313E+04 | 2.5610E+04 |

夹角也就越大; 所以,  $r_2$  越大, 小行星刚被地球捕获时的相对速率越大。我们的计算结果也给出了相同的结论, 详见表 2。 $r_1$  越小, 小行星的机械能也越小, 它被地球捕获时的绝对速率也就越小; 可是  $r_1$  越小, 轨道越扁, 它被地球捕获时, 自身运动方向与地球运动方向的夹角反而越大, 相对速率可能会变大。所以, 当  $r_1$  变小时, 很难通过理论分析来确定小行星刚被地球捕获时的相对速率到底是变小还是变大。而我们的计算结果清晰的显示: 当  $r_1$  变小时, 相对速率反而会变大, 详见表 2。

### 3.4. 小行星撞击地面时的速率和动能

小行星在撞击地球的过程中, 只有地球引力做功, 根据公式(6)可以求出小行星撞击地面时的速率, 详见表 3。根据公式(7), 可以求出小行星撞击地面时的动能, 详见表 4。我们的计算结果显示:  $r_2$  越大,

**Table 3.** The velocity of an asteroid, when it is hitting the Earth. The velocity is in unit of m/s  
**表 3.** 小行星撞击地面时的速率, 单位是 m/s

| 近日点距离 (AU) | 1.9000     | 2.1500     | 远日点距离 2.6500 | (AU) 3.2500 | 3.5000     | 3.9500     | 5.2075     |
|------------|------------|------------|--------------|-------------|------------|------------|------------|
| 1.0009     | 1.1989E+04 | 1.2260E+04 | 1.2745E+04   | 1.3222E+04  | 1.3392E+04 | 1.3661E+04 | 1.4230E+04 |
| 0.9500     | 1.2943E+04 | 1.3338E+04 | 1.3997E+04   | 1.4607E+04  | 1.4816E+04 | 1.5143E+04 | 1.5813E+04 |
| 0.9000     | 1.3868E+04 | 1.4374E+04 | 1.5185E+04   | 1.5906E+04  | 1.6150E+04 | 1.6526E+04 | 1.7282E+04 |
| 0.8500     | 1.4791E+04 | 1.5397E+04 | 1.6343E+04   | 1.7166E+04  | 1.7439E+04 | 1.7858E+04 | 1.8691E+04 |
| 0.8000     | 1.5716E+04 | 1.6415E+04 | 1.7484E+04   | 1.8397E+04  | 1.8698E+04 | 1.9156E+04 | 2.0057E+04 |
| 0.7500     | 1.6650E+04 | 1.7434E+04 | 1.8617E+04   | 1.9612E+04  | 1.9938E+04 | 2.0430E+04 | 2.1392E+04 |
| 0.7000     | 1.7597E+04 | 1.8461E+04 | 1.9749E+04   | 2.0819E+04  | 2.1167E+04 | 2.1691E+04 | 2.2707E+04 |
| 0.6500     | 1.8565E+04 | 1.9502E+04 | 2.0887E+04   | 2.2027E+04  | 2.2394E+04 | 2.2947E+04 | 2.4012E+04 |
| 0.6000     | 1.9557E+04 | 2.0564E+04 | 2.2039E+04   | 2.3241E+04  | 2.3627E+04 | 2.4206E+04 | 2.5316E+04 |
| 0.5500     | 2.0582E+04 | 2.1654E+04 | 2.3211E+04   | 2.4471E+04  | 2.4874E+04 | 2.5476E+04 | 2.6625E+04 |
| 0.5000     | 2.1645E+04 | 2.2778E+04 | 2.4412E+04   | 2.5724E+04  | 2.6142E+04 | 2.6764E+04 | 2.7948E+04 |

**Table 4.** The kinetic energy of an asteroid, when it is hitting the Earth. The energy is in unit of the joule  
**表 4.** 小行星撞击地面时的动能, 单位是焦耳

| 近日点距离 (AU) | 1.9000     | 2.1500     | 远日点距离 2.6500 | (AU) 3.2500 | 3.5000     | 3.9500     | 5.2075     |
|------------|------------|------------|--------------|-------------|------------|------------|------------|
| 1.0009     | 1.0725E+23 | 1.1215E+23 | 1.2120E+23   | 1.3045E+23  | 1.3382E+23 | 1.3926E+23 | 1.5108E+23 |
| 0.9500     | 1.2499E+23 | 1.3275E+23 | 1.4619E+23   | 1.5919E+23  | 1.6379E+23 | 1.7110E+23 | 1.8658E+23 |
| 0.9000     | 1.4351E+23 | 1.5417E+23 | 1.7204E+23   | 1.8879E+23  | 1.9461E+23 | 2.0377E+23 | 2.2286E+23 |
| 0.8500     | 1.6324E+23 | 1.7689E+23 | 1.9930E+23   | 2.1986E+23  | 2.2693E+23 | 2.3796E+23 | 2.6068E+23 |
| 0.8000     | 1.8430E+23 | 2.0104E+23 | 2.2810E+23   | 2.5254E+23  | 2.6087E+23 | 2.7379E+23 | 3.0015E+23 |
| 0.7500     | 2.0684E+23 | 2.2678E+23 | 2.5861E+23   | 2.8700E+23  | 2.9660E+23 | 3.1143E+23 | 3.4144E+23 |
| 0.7000     | 2.3106E+23 | 2.5429E+23 | 2.9102E+23   | 3.2342E+23  | 3.3430E+23 | 3.5106E+23 | 3.8473E+23 |
| 0.6500     | 2.5715E+23 | 2.8379E+23 | 3.2553E+23   | 3.6201E+23  | 3.7420E+23 | 3.9289E+23 | 4.3023E+23 |
| 0.6000     | 2.8539E+23 | 3.1554E+23 | 3.6242E+23   | 4.0304E+23  | 4.1654E+23 | 4.3719E+23 | 4.7819E+23 |
| 0.5500     | 3.1607E+23 | 3.4986E+23 | 4.0200E+23   | 4.4683E+23  | 4.6165E+23 | 4.8426E+23 | 5.2892E+23 |
| 0.5000     | 3.4958E+23 | 3.8712E+23 | 4.4466E+23   | 4.9375E+23  | 5.0991E+23 | 5.3449E+23 | 5.8280E+23 |

小行星撞击地面时的速率和动能越大;  $r_1$  越小, 小行星撞击地面时的速率和动能越大; 最大动能是最小动能的 5.4340 倍。

小行星的密度和岩石很接近, 它的比热也可以采用岩石的比热:  $0.8374 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ 。以  $r_2 = 2.65 \text{ AU}$ ,  $r_1 = 0.60 \text{ AU}$  的轨道穿插的撞击情况为例, 根据公式(14), 可以求出小行星自身会升温 290,017 摄氏度。岩石的熔点约为 1500 摄氏度, 地面的平均温度约为 15 摄氏度; 小行星自身升温 290,017 摄氏度就意味着小行星自身会熔化 195 次。实际上, 小行星自身剧烈升温后, 不可避免的会向周围环境散热。小行星自身熔化 195 次, 实际上意味着小行星会将自身及其周围 194 倍自身质量的地壳全部熔化。

地壳厚度分布不均匀, 大洋底部的地壳最薄, 厚度约为几千米; 而青藏高原的地壳最厚, 厚度约为几十千米。引起恐龙灭绝的那颗小行星直径约为 10 千米, 撞击点位于北美洲尤坦卡半岛附近的浅海海域

**Table 5.** The kinetic energy of an asteroid, when it is hitting the Earth. The energy is in unit of trillion tons of TNT  
**表 5.** 小行星撞击地面时的动能, 单位是万亿吨 TNT 当量

| 近日点距离<br>(AU) | 1.9000 | 2.1500 | 远日点距离<br>2.6500 | (AU)<br>3.2500 | 3.5000 | 3.9500 | 5.2075 |
|---------------|--------|--------|-----------------|----------------|--------|--------|--------|
| 1.0009        | 25.63  | 26.80  | 28.97           | 31.18          | 31.98  | 33.28  | 36.11  |
| 0.9500        | 29.87  | 31.73  | 34.94           | 38.05          | 39.15  | 40.89  | 44.59  |
| 0.9000        | 34.30  | 36.85  | 41.12           | 45.12          | 46.51  | 48.70  | 53.27  |
| 0.8500        | 39.01  | 42.28  | 47.63           | 52.55          | 54.24  | 56.87  | 62.30  |
| 0.8000        | 44.05  | 48.05  | 54.52           | 60.36          | 62.35  | 65.44  | 71.74  |
| 0.7500        | 49.44  | 54.20  | 61.81           | 68.59          | 70.89  | 74.43  | 81.61  |
| 0.7000        | 55.22  | 60.78  | 69.55           | 77.30          | 79.90  | 83.91  | 91.95  |
| 0.6500        | 61.46  | 67.83  | 77.80           | 86.52          | 89.44  | 93.90  | 102.83 |
| 0.6000        | 68.21  | 75.42  | 86.62           | 96.33          | 99.56  | 104.49 | 114.29 |
| 0.5500        | 75.54  | 83.62  | 96.08           | 106.79         | 110.34 | 115.74 | 126.42 |
| 0.5000        | 83.55  | 92.52  | 106.28          | 118.01         | 121.87 | 127.75 | 139.29 |

[2] [17], 那里的地壳厚度可以近似认为是 20 千米。小行星可以将 194 倍自身质量的地壳全部熔化, 就意味着小行星可以将撞击点附近很大范围内的地壳全部撞穿, 地幔物质喷涌而出, 引起大规模的火山爆发, 火山灰遮天蔽日达数年之久, 气温骤降, 最终导致恐龙灭绝。

## 4. 讨论

### 4.1. 与前人工作对比

引起恐龙灭绝的那颗小行星撞击地球的能量相当于 100 万亿吨 TNT 当量[19]。1 吨 TNT 炸药释放的能量为  $4.184 \times 10^9$  J, 这样就可以把撞击能量表示成 TNT 当量的形式, 详见表 5。通过表 5 可以看出, 对于轨道相切的撞击情况, 我们的计算结果与 100 万亿吨 TNT 当量相比, 明显要小很多; 而对于轨道穿插而且  $r_1$  介于 0.50~0.65AU 的撞击情况, 我们的计算结果与 100 万亿吨 TNT 当量基本一致。

### 4.2. 太阳演化对地球和小行星轨道的影响

本文根据现在的地球轨道半长轴和小行星带轨道半长轴, 算出了小行星撞击地球的能量。可是灭绝恐龙的那颗小行星是在 6500 万年前撞击地球的, 当时的地球轨道半长轴和小行星带轨道半长轴是否和现在一样呢? 一方面, 太阳在演化的过程中由于热核反应和星风会损失质量, 而太阳质量损失会导致行星轨道向外迁移[20] [21]。另一方面, 太阳和行星之间有潮汐作用, 潮汐力会引起行星轨道向内迁移[21]-[25]。不过, 太阳在主序阶段这两个效应都很弱, 对行星轨道的影响都很小; 从 6500 万年前到现在, 由于这两个效应而引起的地球轨道半长轴和小行星带轨道半长轴的相对变化量仅为十万分之一[26]。

## 致 谢

本项研究工作得到了普洱学院自然科学基金(基金号: K2015030)、云南省教育厅自然科学基金(基金号: 2012Y 和 2014Y)和国家自然科学基金(基金号: 11265012)的支持。

## 参考文献 (References)

- [1] DeMeo F E, Carry B. *Natur.*, 2014, 505: 629 <http://dx.doi.org/10.1038/nature12908>
- [2] Fernández Y R, Li J Y, Howell E S, Woodney L M. *Treatise on // Schubert, G., Editor in Chief, Spohn, T., Editor,*



Geophysics. 2nd Edition, Volume10 Chapter 15

- [3] Clark B E, Ziffer J, Nesvorný D, et al. JGRE, 2010, 115: E06005
- [4] Ockert-Bell M E, Clark B E, Shepard M K, et al. Icar., 2010, 210: 674 <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2010.08.002>
- [5] Fornasier S, Clark B E, Dotto E. Icar., 2011, 214: 131 <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2011.04.022>
- [6] Carry B. Planetary and Space Science, 2012, 73: 98 <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2012.03.009>
- [7] Bottke W F Jr, Durda D D, Nesvorný D, et al. Icar., 2005, 175: 111
- [8] 约翰·巴利, 波·瑞普斯, 著. 萧耐园译. 恒星与行星的诞生. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2009
- [9] Morbidelli A, Lunine J I, O'Brien D P, et al. AREPS, 2012, 40: 251
- [10] Britt D T, Consolmagno G J. M&PS, 2003, 38: 1161 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00305.x>
- [11] Consolmagno G J, Britt D T. M&PS, 1998, 33: 1231 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.1998.tb01308.x>
- [12] Pravec P, Harris A W. Icar., 2000, 148: 12 <http://dx.doi.org/10.1006/icar.2000.6482>
- [13] Margot J L, Nolan M C, Benner L A M, et al. Sci., 2002, 296: 1445 <http://dx.doi.org/10.1126/science.1072094>
- [14] Descamps P, Marchis F, Berthier J, et al. Icar., 2011, 211: 1022 <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2010.11.016>
- [15] Taylor P A, Howell E S, Nolan M C, et al. AAS/DPSMA, 2013, 45: 208.08
- [16] Brown P. JIMO, 2013, 41: 22.
- [17] Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, Michel H V. Sci., 1980, 208: 1095  
<http://dx.doi.org/10.1126/science.208.4448.1095>
- [18] Allen C W. Astrophysical Quantities. London: The Athlone Press, 1973
- [19] David F. APS/4CF, 1998, J1: 2
- [20] Sackmann I-J, Boothroyd A I, Kraemer K E. ApJ, 1993, 418: 457 <http://dx.doi.org/10.1086/173407>
- [21] Silvotti R, Schuh S, Janulis R, et al. Natur., 2007, 449: 189 <http://dx.doi.org/10.1038/nature06143>
- [22] Schröder K-P, Smith R C. MNRAS, 2008, 386: 155 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13022.x>
- [23] Kunitomo M, Ikoma M, Sato B, et al. ApJ, 2011, 737: 66 <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/737/2/66>
- [24] Veras D, Wyatt M C. MNRAS, 2012, 421: 2969 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20522.x>
- [25] Veras D, Wyatt M C, Mustill A J, et al. MNRAS, 2011, 417: 2104 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19393.x>
- [26] Guo J P, Lin L, Bai C Y, Liu J Z. Ap&SS, 2016, 361: 122 <http://dx.doi.org/10.1007/s10509-016-2684-5>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>