

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.03.01

# 小行星热物理及 Yarkovsky 效应和 YORP 效应的研究进展

姜浩轩<sup>1,2</sup>, 季江徽<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026; 3. 中国科学院 行星科学重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 小行星热物理的研究是近年来小行星研究中一个前沿方向。简单阐述了在小行星热物理这一研究领域中常用的热物理模型, 利用这些热物理模型并结合空间或地面红外望远镜的观测数据, 可获得小行星的一些热物理参数, 如热惯量、几何反照率、有效直径、表面粗糙度、表面温度等。介绍了小行星的形状模型及红外观测, 还介绍了利用这些模型得到的部分小行星热物理参数。通过这些热物理参数, 可进一步研究小行星的 Yarkovsky 效应和 YORP 效应等, 甚至可为人造航天器着陆小行星表面及小行星采样返回任务提供相关科学信息。

**关键词:** 小行星; 热物理模型; 红外观测; Yarkovsky 效应; YORP 效应

**中图分类号:** P185.7      **文献标识码:** A

## 1 引 言

随着红外观测技术的提高, 越来越多的小行星在红外波段被探测到, 小行星热物理研究也越来越受到人们的关注。由于小行星受太阳光的照射, 其表面有一定的温度, 因此会产生一定的红外辐射。对于小行星热物理的研究过程, 人们主要通过建立热物理模型来模拟小行星发出的红外辐射。利用热物理模型计算小行星表面发出的红外辐射流量, 人们必须得到小行星表面的温度分布。而温度的高低分布取决于多种因素, 如太阳光辐射的吸收、多重散射和反射、光子的热辐射及热传导等。在热物理模型使用过程中, 人们需要考虑小行星的反照率、热传导率、比热容、热发射率、密度、粗糙度等诸多因素。人们研究小行星热物理的目的, 是为了得到小行星的热物理参数, 如表面反照率、热惯量、表面粗糙度以及有效直径等。基于热物理模型得到的辐射流量与红外观测数据, 人们通过拟合可得上述热物理参数<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2017-10-24; 修回日期: 2018-03-05

资助项目: 国家自然科学基金 (11473073, 11661161013); 中国科学院创新交叉团队项目; 紫金山天文台小行星基金会资助

通讯作者: 季江徽, jijh@pmo.ac.cn

早期提出的热物理模型是基于多种假设下的模型,如 Lebofsky 提出的标准热模型 (standard thermal model, STM),该模型把小行星看做表面光滑的无自转球体,且观测相位角为零<sup>[2]</sup>。再如快速自转模型 (fast rotation model, FRM),该模型适用于快速自转且热惯量很大的小行星<sup>[3]</sup>。上述两个模型主要适用于主带小行星,而对于近地小行星,由于其形状不规则,表面粗糙度较大,并且都有一定的自转,与 STM 和 FRM 的基本假设不符。为此, Harris 在 STM 和 FRM 的基础上做了改进,建立了近地小行星热物理模型 (near-earth asteroid thermal model, NEATM)。与 STM 和 FRM 相同, NEATM 也将小行星背向太阳一面的辐射流量看做零;不同的是, NEATM 考虑了相位角对辐射流的影响,可得到近地小行星的大小以及几何反照率<sup>[4]</sup>。

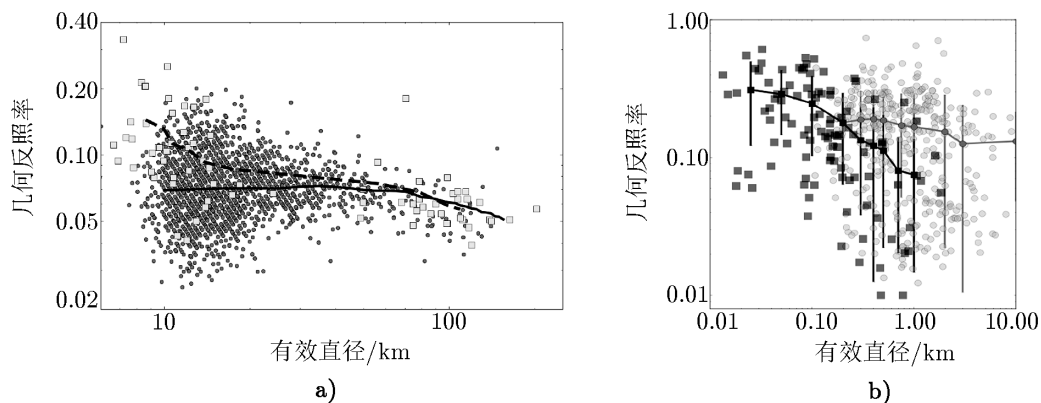
STM, FRM, NEATM 这些热物理模型都将小行星看作是球体,并没有考虑小行星形状对入射太阳光的影响,而且使用的计算温度的方法也比较简单。为此, Lagerros<sup>[5]</sup>在 1996 年提出了最经典的小行星热物理模型 (thermal physical model of asteroids, TPM)。在此模型中,他将小行星近似为三轴椭球体,在椭球体上任一面元上应用一维热传导方程以及特定的边界条件进行温度计算,进而计算理论辐射通量,同时也考虑了观测视角的问题。该模型既适用于主带小行星,也适用于近地小行星。Horner 等人<sup>[6]</sup>在 TPM 模型基础上利用 WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) 的红外观测数据进行计算,得到特洛伊天体 (1173)Anchise 的热惯量为  $25\sim 100 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ ,几何反照率为 0.0027。Hanuš 等人<sup>[8]</sup>在 TPM 模型基础上利用 IRAS (Infrared Astronomical Satellite)、AKARI 和 Spitzer 的红外数据,获得近地小行星 (3200)Phaethon 的热惯量为  $(600\pm 200) \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ ,几何反照率为  $0.122\pm 0.08$ ,有效直径为  $(5.1\pm 0.2) \text{ km}$ 。但 TPM 也有自身的缺陷,小行星表面并非完全光滑,粗糙的表面碎石和陨石坑等会对入射的太阳辐射产生所谓热红外束流效应<sup>[11]</sup>,即在某一个观测相位角上,从小行星表面观测到的红外辐射有突增的现象,这种效应对确定小行星表面热物理参数有较大的影响<sup>[10]</sup>。Rozitis 和 Green<sup>[12]</sup>在 2011 年提出了热物理模型 ATPM (advanced thermal physical model),该模型不仅考虑了热红外束流效应的影响,还考虑了不同面元之间的相互辐射,从而能更加精确地确定小行星表面热物理参数。

小行星的 Yarkovsky 效应和 YORP 效应 (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack effect) 与小行星的热物理参数密切相关,这两种效应均产生于太阳辐射。Yarkovsky 效应是太阳光照产生的光子力使小行星的轨道半长径发生改变的现象, YORP 效应是太阳光照产生的光子力矩使小行星的自转轴和自转速率发生变化的现象<sup>[13]</sup>。通过研究小行星的 Yarkovsky 效应,人们可以更加准确地预测小行星的轨道,从而能够提前发现对地球构成潜在撞击危险的小行星。另一方面,通过对小行星的 YORP 效应进行研究,人们可以更准确地计算小行星的自转特性,得到其自转轴变化规律。Rozitis 和 Green<sup>[14]</sup>在 2012 年利用 ATPM 模型分别研究了小行星 (1620)Geographos 和 (6489)Golevka 的 Yarkovsky 效应和 YORP 效应,具体内容详见本文第 5 章。第 2 章简要介绍了小行星地基和空间红外观测情况;第 3 章介绍了小行星的三维形状模型的建立;第 4 章介绍了小行星热物理研究的主要模型以及小行星深空探测对象的热物理研究进展;最后是总结和展望。

## 2 红外观测

20 世纪 70 年代起, 小行星的地基红外观测在确定小行星的热物理参数上扮演越来越重要的角色。著名的大型地基红外望远镜, 如坐落在西班牙的 GTC (Gran Telescopio Canarias), 上面安装了红外观测设备 CanariCam, CanariCam 的工作波段是  $7.5\sim 25\ \mu\text{m}$ ; 再如日本的地面红外观测望远镜——昴星团望远镜 (Subaru Telescope), 建造于 1998 年, 口径为  $8.2\ \text{m}$ , 坐落在夏威夷的莫纳克亚山上, 安装的红外观测设备是 MOIRCS (Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph), IRCS (Infrared Camera and Spectrograph), COMICS (Cooled Mid Infrared Camera and Spectrometer)。

由于受到地球大气的影响, 以及对小行星红外探测精度要求的提高, 普通的地基红外设备将难以满足需求。空间红外望远镜的诞生加快了小行星热物理研究的进程。过去的数十年时间里, 科学家们将空间红外望远镜的观测数据与理论值进行拟合, 得到了大量小行星的轨道和热物理参数<sup>[15]</sup>。IRAS 是第一颗进行全天区探测的空间红外望远镜, 该望远镜于 1983 年在美国发射, 该望远镜有 4 个红外观测波长, 分别为  $12, 25, 60, 100\ \mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>, 并且该望远镜发现了 4 颗小行星: (3200)Phaethon, (3728)IRAS, (10714)1983 QG, (100004)1983 VA。继 IRAS 之后, 陆续又发射了 Spitzer, AKARI, Herschel 和 WISE 等红外卫星。这些红外卫星涵盖了各天区的观测数据, 并得到大量小行星的尺寸和反照率 (见图 1)<sup>[15]</sup>, 例如由 AKARI 得到的小行星尺寸和反照率数据可从相关网站上获得<sup>[17]</sup>。Hanuš 等人在计算小行星 (3200)Phaethon 的热物理参数时对 IRAS 和 AKARI 的热红外数据进行过拟合<sup>[8]</sup>。

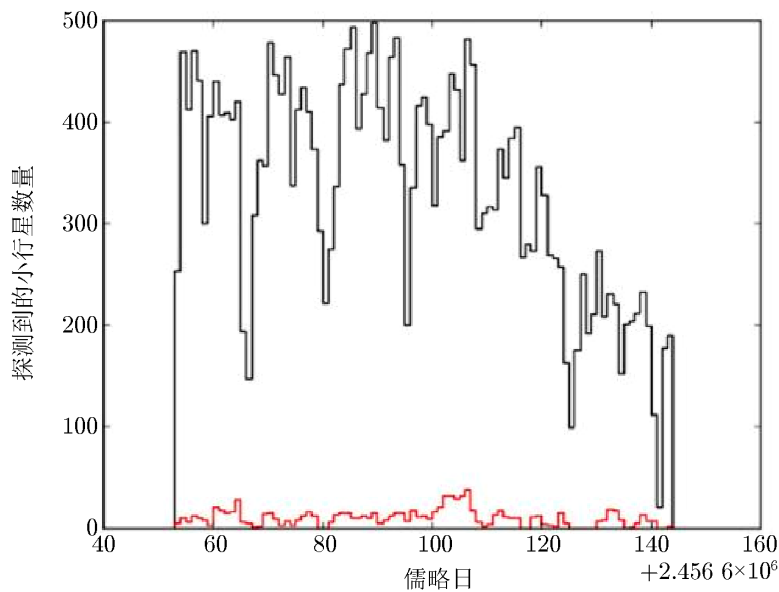


注: a) 表示特洛伊天体几何反照率随有效直径的变化情况, 灰色实心圆圈代表 NEOWISE 的观测样本, 灰色方框代表 Spitzer 望远镜的观测样本, 实线和虚线分别代表 NEOWISE 和 Spitzer 望远镜观测样本几何反照率的中位数。b) 灰色圆圈表示 NEOWISE 在红外波段所观测到的小行星几何反照率与直径的关系, 灰色线代表观测样本几何反照率中位数, 黑色正方形表示可见光波段几何反照率随有效直径增加而减小, 黑色线表示可见光波段观测样本几何反照率中位数。

图 1 几何反照率和有效直径的变化关系<sup>[15]</sup>

WISE 发射于 2009 年, 并于 2010 年 1—7 月在  $3.6, 4.6, 12, 22\ \mu\text{m}$  (W1, W2, W3, W4)

4 个波段对全天区进行了观测<sup>[18]</sup>。随后该望远镜 W3 和 W4 波段的冷却液耗尽,经历了较长时间的休眠期,直到 2013 年 8 月该望远镜重新启用,更名为 NEOWISE (Near-Earth Object WISE),利用 W1 和 W2 波段探测小行星<sup>[9]</sup>。截止目前,WISE 已发现上万颗小行星,包括 391 颗近地小行星<sup>[15]</sup>。图 2 展示了 WISE 观测到的小行星数量随时间的变化情况。WISE 的 4 个红外波段中,W1 和 W2 波段以反射的太阳光占主导,所以在处理这两个波段的数据时需要考虑太阳光的影响,例如 Alf-Lagoa 等人<sup>[20]</sup>在使用 WISE 红外数据计算 2008 EV5 的热物理参数时,删除了 W1 波段的数据,因为其中大约 2/3 的辐射都是反射太阳光,而 W2 波段中反射太阳光所占的比重与其观测误差相仿,所以没有考虑太阳光对 W2 波段的影响。而 Horner 等人在计算 (1173)Anchises 时,只用到 W3 和 W4 波段的红外数据<sup>[6]</sup>。WISE 和 NEOWISE 的红外数据可从 NASA 的红外科学数据库得到<sup>[7]</sup>。



注: 红线表示 NEO 的数量, 黑线表示所有小行星的数量。

图 2 NEOWISE 探测到的小行星数量随时间的变化情况<sup>[9]</sup>

NEOWISE 作为一个独立的红外巡天计划,基于其红外观测数据,人们可使用特定的数据处理方法选择出移动目标。这类移动目标被归为一个独立的系统,称为 WMOPS (WISE moving object processing system),其中的移动目标均至少有五次 15 h 以上的探测。WMOPS 的主要结果之一便是小行星的几何反照率几乎不随小行星直径大小而变化,而在可见光波段,几何反照率随着直径的增大呈现下降趋势(见图 1)。同时 NEOWISE 发现的近地小行星几何反照率比可见光波段发现的小行星低。图 2 给出了 NEOWISE 探测到的小行星数量随时间的变化情况<sup>[15]</sup>。除此之外,Spitzer 和 Herschel 是两个分别发射于 2003 年和 2009 年的空间望远镜,Müller 等人<sup>[21]</sup>利用 Herschel 望远镜对小行星 (99942)Apophis 的观测,得到其热惯量为  $600 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ 。Emery 等人<sup>[22]</sup>在 TMP 模型的基础上,利

用 Spitzer 和 Herschel 的红外观测数据, 计算得到近地小行星 (101955)Bennu 的热惯量为  $(310 \pm 70) \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ 。Mainzer 等人<sup>[15]</sup>对近年来空间红外望远镜以及它们所做的小行星观测和新发现的小行星进行了总结。

### 3 形状模型

#### 3.1 光变曲线模型

小行星的形状模型是研究热物理的重要基础。正如前文所提到, 在不同的热物理模型中采用的形状模型不一样, FRM 和 STM 均将小行星看作球体, 而 TPM 和 ATPM 则将小行星看作由若干面元组成的多面体。最初的小行星形状模型是通过光变曲线反演得到的。由于小行星表面反照率不均匀, 且形状不规则, 因此小行星在自转时其亮度会发生变化, 从而形成其特殊的光变曲线<sup>[23]</sup>。通过光变曲线反演, 不仅能得到小行星表面的形状特征, 也能得到小行星的自转轴指向等。2001 年 Kassalainen 和 Torppa<sup>[24]</sup>介绍了光变曲线的最优化方法, 该方法较为真实地反演出大多数凸体和非凸体小行星的形状以及自转轴指向。Hanuš 等人<sup>[8]</sup>在 2016 年所采用的形状模型就是通过光变曲线反演得到的, 他们通过光变曲线, 测得了小行星 (3200)Phaethon 的自转轴指向为:  $(\lambda_1, \beta_1) = (319^\circ, -39^\circ)$ , 或  $(\lambda_2, \beta_2) = (84^\circ, -39^\circ)$ , 自转周期为 3.603 h。其他小行星的光变曲线形状模型可在 Āurech 等人建立的小行星形状模型数据库中得到 (Database of Asteroid Models from Inversion Techniques, DAMIT)<sup>[25]</sup>。但由光变曲线方法得到的形状模型有一定的局限性, 在小行星的热物理研究中, 有时需要用到非常精确的小行星三维形状模型, 例如研究小行星的 YORP 效应时, 其计算结果受小行星尺寸及表面地势起伏的影响较大, 即对小行星表面状况非常敏感<sup>[14]</sup>。由于通过光变曲线只能得到小行星的总光度, 无法给出小行星表面具体的结构; 并且在测光过程中, 小行星的大小形状等因素会对测光精度造成很大影响, 因而通过光变曲线反演所得到的形状模型并不是精确的形状模型。雷达观测能够解决这个问题。

#### 3.2 雷达模型

雷达观测小行星的主要原理为, 通过雷达测站或航天器携带的雷达观测设备向小行星发射电磁波, 小行星将该电磁波反射到观测设备。由于小行星的运动和自转, 接收到的回波会产生多普勒效应, 因此, 通过测量回波的某些特性 (如时延和频率变化), 我们可得到小行星表面各个部分与测站的相对距离以及视向速度<sup>[26]</sup>。早在 20 世纪六七十年代, 美国国家航空航天局利用地基雷达对小行星 (1566)Icarus 进行了探测, 目前主要的地基雷达有 Arecibo 和 Goldstone 等。经过后人的不断钻研, 目前人们已提出较完善的用雷达探测小行星以及计算小行星形状模型的方法, 即连续探测和延时多普勒探测。利用这两种方法, 人们可以反演小行星的形状模型和自转状态等参数。

通常人们在三轴椭球模型的基础上建立初始模型。确定好该三轴椭球后, 需要生成球谐函数, 使用 8 阶球谐函数表示小行星表面的地形起伏:

$$r(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^N \left[ a_{l0} P_l^0(\cos \theta) + \sum_{m=1}^l (a_{lm} \cos(m\phi) + b_{lm} \sin(m\phi)) P_l^m(\cos \theta) \right], \quad (1)$$

其中,  $r(\theta, \phi)$  是球坐标系下某个点相对于模型中心点的位置坐标,  $a_{lm}$  和  $b_{lm}$  表示球谐函数展开式中的系数,  $P_l^m$  是勒让德多项式。但由于雷达回波对距离极为敏感, 地基雷达观测只能探测到部分接近地球的近地小行星以及体积较大的主带小行星, 星载雷达观测只应用于少数小行星, 如小行星 Itokawa 和 Toutatis, 因此能够用雷达观测到并且通过计算得到形状模型的小行星所占比例并不高。Hudson 和 Ostro<sup>[28]</sup> 利用雷达数据得到了小行星 (1620)Geographos 的更精确的形状模型, 基于该形状模型, Rozitis 和 Green<sup>[14]</sup> 计算了该小行星的 Yarkovsky 和 YORP 效应。更多的小行星雷达模型数据可参考 NASA 相关网站<sup>[29]</sup>。

#### 4 小行星热物理模型及其应用

无论 TPM 还是 ATPM, 都将小行星看作由多个三角面元组成的多面体, 小行星的形状模型和自转轴可通过光变曲线或雷达模型得到。这样做的目的是通过解一维热传导方程得到每个面元的温度, 进而得到每个面元所发出的辐射通量, 再将所有面元的辐射通量相加, 得到总的理论辐射通量, 从而可以与观测到的辐射进行拟合。如 Rozitis 和 Green 提出的 ATPM 理论<sup>[12]</sup>, 仅考虑垂直于面元方向的一维热传导, 热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho C} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2)$$

式 (2) 的边界条件为:

$$(1 - A_B)\{[1 - s(t)]\Psi(t)F_{\text{sun}} + F_{\text{scat}}\} + (1 - A_{\text{th}})F_{\text{rad}} + \kappa \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} - (\varepsilon k T^4)_{x=0} = 0, \quad (3)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z \rightarrow \infty} = 0. \quad (4)$$

式 (2) 和式 (3) 中,  $\kappa, \rho, C$  分别代表热传导率、密度和比热容,  $x$  为在该面元表面下的深度,  $A_B$  为邦德反照率,  $F_{\text{sun}}$  表示太阳入射到小行星面元的辐射流量,  $F_{\text{scat}}$  表示由面元散射出的辐射流量,  $F_{\text{rad}}$  代表面元本身发射出的辐射流量,  $\varepsilon$  为热发射率,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $s(t)$  表示在时间  $t$  该面元是否处在阴影当中,  $\Psi(t)$  则代表太阳入射角的余弦值。

在进行适当的变换后, 利用合适的差分方法即可解出此一维热传导方程。在得到每个面元的温度分布后, 便可根据普朗克公式求解该面元的辐射强度:

$$I_{\lambda,i}(\tau) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_i}\right) - 1}, \quad (5)$$

式 (5) 中,  $h$  是普朗克常数,  $c$  为真空中光速。观测者观测到的面元  $i$  的辐射流量为:

$$F_{\lambda,i}(\tau) = I_{\lambda,i}(\tau) \frac{a_i}{\pi d_i^2} \cos \theta_i, \quad (6)$$

其中,  $a_i$  是面元  $i$  的面积,  $d_i$  是面元  $i$  到观测者之间的距离,  $\theta_i$  为观测角。观测者所观测到

的总辐射流量的理论值为小行星的所有面元和粗糙面的辐射流量的加权:

$$F_{\lambda}(\tau) = \sum_{i=1}^N v_i(\tau) \left[ (1 - f_R) F_{\lambda,i}(\tau) + ACF \cdot f_R \sum_{j=1}^M v_{ij}(\tau) F_{\lambda,ij}(\tau) \right]. \quad (7)$$

在理论值与观测值拟合过程中, 可用  $\chi^2$  来表征拟合程度的好坏<sup>[30]</sup>:

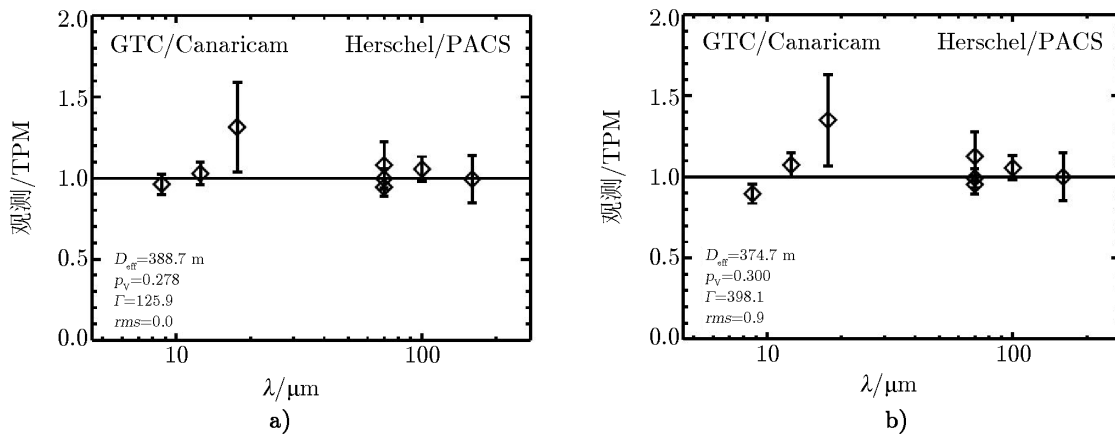
$$\chi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{FCF \times F_{\lambda} - F_{\text{obs}}(\lambda_i)}{\sigma_{\lambda_i}} \right]^2, \quad (8)$$

其中,  $F_{\lambda}$  为辐射流量的理论值,  $F_{\text{obs}}$  为在特定波长下辐射流量的观测值,  $FCF$  是与邦德反照率  $A_B$  有关的物理量, 称为流量修正因子<sup>[31]</sup>.

下面列举了一些利用 TPM 和 ATPM 来拟合表面热物理参数的小行星, 这些对象均为小行星空间探测任务的目标小行星。

#### 4.1 小行星 (99942) Apophis

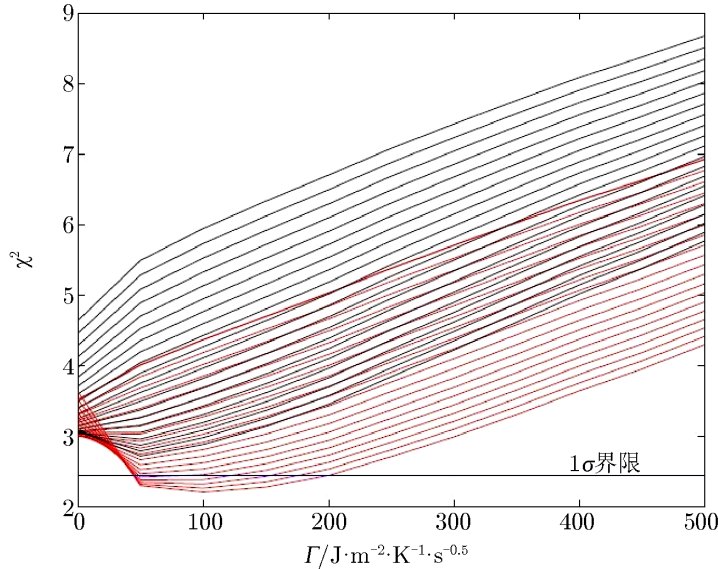
小行星 Apophis 是一颗具有撞击地球可能性的近地小行星, 2013 年 3 月其与地球交会时, 天文学家利用 Herschel 空间望远镜的红外观测设备 PACS 对其进行了观测, 观测波长分别为 70, 100, 160  $\mu\text{m}$ 。Müller 等人利用这些观测数据并结合热物理模型 TPM, 得到其有效直径为  $375_{-10}^{+14}$  m, V 波段的几何反照率为  $0.3_{-0.06}^{+0.05}$ , 热惯量为 250 ~ 800 (最佳值为 600, 单位为  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ )<sup>[21]</sup>。2013 年 1 月 29 日, 天文学家利用地面望远镜 GTC 的中红外拍照设备 CanariCam 对小行星 Apophis 在 3 个波段进行了观测, 观测波长分别为 8.7, 12.5, 17.65  $\mu\text{m}$ 。Licandro 等人利用这两个望远镜的观测数据, 重新对小行星 Apophis 的热物理参数进行了拟合, 得到其有效直径为 380 ~ 393 m, 几何反照率为 0.24 ~ 0.33, 热惯量为 50 ~ 500  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[32]</sup>。图 3 给出小行星 Apophis 在不同表面粗糙度下观测到的红外辐射流量与理论计算值的比较结果。



注: a) 粗糙度  $f_R = 0.0$ ; b)  $f_R = 0.9$ 。

图 3 不同粗糙度下 GTC/CanariCam 和 Herschel/PACS 的观测与理论值的比较<sup>[32]</sup>

Yu 等人<sup>[33]</sup>则利用这些观测数据并结合 ATPM, 对小行星 Apophis 的热物理进行了细致研究, 同时考虑了热发射率随波长的变化情况, 通过对辐射流量的观测值和理论值进行拟合得到其热惯量为  $\Gamma = 100_{-52}^{+100} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$  (见图 4), 几何反照率  $p_v = 0.286_{-0.029}^{+0.030}$ , 有效直径  $D_{\text{eff}} = 378_{-29}^{+19} \text{ m}$ 。



注: 表面粗糙度  $f_R = 0.0 \sim 1.0$ , 黑色线表示热发射率为常数的情况, 红色线表示热发射率随波长变化的情况,  $\Gamma$  代表热惯量。

图 4 对小行星 Apophis 辐射流量观测值和理论值进行拟合时, 不同热惯量与表面粗糙度对应的均方根  $\chi^2$  值的关系<sup>[33]</sup>

#### 4.2 小行星 (175706)1996 FG3

小行星 1996 FG3 是一颗 Apollo 型双小行星, 1996 年 Mottola 和 Lahulla<sup>[34]</sup> 在光学波段观测到该系统的掩食现象; 之后, Scheirich 和 Pravec<sup>[35]</sup> 测得主星和伴星的互相绕转周期为  $(16.14 \pm 0.01) \text{ h}$ , 直径比为  $D_2/D_1 = 0.28_{-0.02}^{+0.01}$ 。同时该小行星也是小行星采样返回任务 MarcoPolo-R 的基准目标<sup>[36]</sup>。与单个小行星相比, 用双小行星更容易实现一些新的探测任务, 并且能够探测到单小行星所不具有的地理特征<sup>[37]</sup>, 因此小行星 1996 FG3 能够很好地满足该采样返回任务对探测目标的要求。结合前人所做的光学观测, Yu 等人<sup>[38]</sup> 利用 Kaasalainen 等人的光变曲线反演形状模型方法, 对 1996 FG3 的形状模型进行了反演。由于该小行星为双小行星, 在反演过程中不能直接利用原始的光变曲线来反演母星的形状模型, 需要考虑到长周期项和短周期项来进行反演。

Walsh 等人<sup>[39]</sup> 及 Wolters 等人<sup>[31]</sup> 在 2012 年和 2011 年分别使用红外观测设备 MIRS1 和 VISIR 对 1996FG3 进行观测, Yu 等人<sup>[38]</sup> 利用这些数据并结合热物理模型 ATPM 对小行星 1996 FG3 的热物理参数进行了拟合, 得到该小行星的有效直径为  $1.69_{-0.02}^{+0.05} \text{ km}$ , 几何反照率为  $0.045_{-0.002}^{+0.002}$ , 热惯量为  $(80 \pm 40) \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ 。在此之前, Wolters 等人利用 ATPM



进行拟合, 得到其热惯量为  $(120 \pm 50) \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 使用 NEATM 进行拟合, 得到的几何反照率为  $0.046 \pm 0.014$ , 有效直径为  $(1.68 \pm 0.25) \text{ km}$ , 该结果与余亮亮等人的结果非常接近。Mueller 得到的有效直径为  $1.8_{-0.5}^{+0.6} \text{ km}$ , 几何反照率为  $0.04_{-0.02}^{+0.04[40]}$ 。

### 4.3 小行星 (101955)Bennu

小行星 (101955)Bennu 也是一颗具有撞击地球可能性的近地小行星, 光谱型为 B 型<sup>[22]</sup>。作为 NASA 的小行星采样返回任务 OSIRIS-REx 目标天体, Bennu 近年来受到广泛的关注。天文学家利用 Arecibo, Goldstone 和 Catalina 1.5 m 望远镜分别在 1999 年、2005 年和 2011 年对 Bennu 进行了雷达和光学波段的观测<sup>[22]</sup>。Nolan 等人<sup>[41]</sup>利用雷达观测和光学观测数据对 Bennu 的形状模型进行了详细研究, 发现 Bennu 是一颗表面相对平滑的小行星, 并且在 1999 年和 2005 年的雷达观测中均在其表面发现了凸起的圆形岩石。2007 年和 2011 年 Spitzer 和 Herschel 空间红外望远镜分别在红外波段对该小行星进行观测。Müller 等人<sup>[42]</sup>使用 Herschel, Spitzer 以及 VLT 的红外数据并结合热物理模型 TPM, 对小行星 Bennu 的热物理特征进行了研究, 得到其有效直径为  $480 \sim 511 \text{ m}$ , 几何反照率为  $0.045_{-0.012}^{+0.015}$ , 热惯量为  $(650 \pm 300) \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ 。除此之外, Emery 等人利用 Spitzer 的红外观测数据并结合 NEATM 模型对小行星 Bennu 进行了研究, 得到其有效直径为  $(484 \pm 10) \text{ m}$ , 几何反照率为  $0.046 \pm 0.005$ , 热惯量为  $(310 \pm 70) \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1[22]}$ 。而 Yu 等人<sup>[30]</sup>利用之前所有的观测数据并结合更加精确的热物理模型 ATPM, 对 Bennu 的表面热物理参数进行了研究, 得到其有效直径为  $510_{-40}^{+6} \text{ m}$ , 几何反照率为  $0.047_{-0.0011}^{+0.0083}$ , 热惯量为  $240_{-60}^{+440} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ , 同时得到其表壤粒径大小 ( $1.3 \sim 31 \text{ mm}$ ) 以及 Bennu 表面的温度分布。图 5 给出在不同波长下小行星 Bennu 辐射流量观测值与理论值的比值。

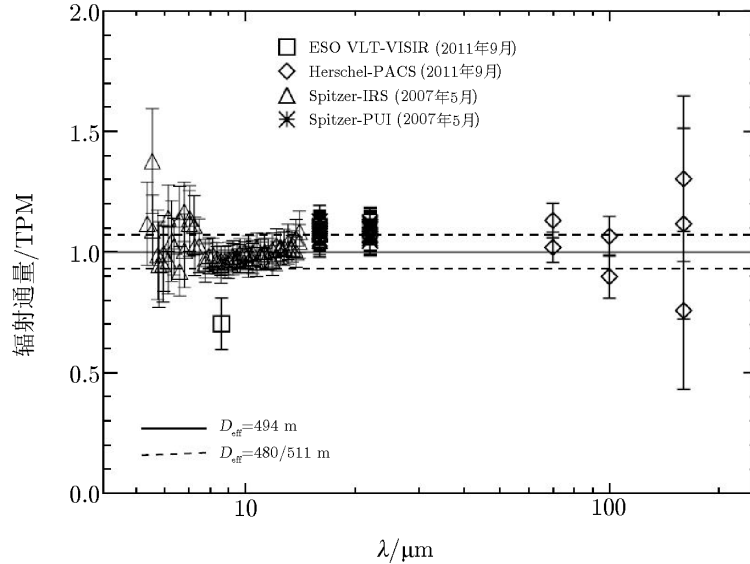


图 5 不同波长下小行星 Bennu 辐射流量观测与 TPM 理论结果的比值<sup>[30]</sup>

#### 4.4 小行星 (162173) Ryugu

作为太阳系中数量最丰富的小行星类型, C 型小行星由于其尺寸较小, 其表面热物理性质(孔隙度、表壤疏松程度、粒径大小分布等)演化程度小, 因此能为研究太阳系早期演化阶段特性以及太阳系起源等提供更有价值的线索<sup>[43]</sup>。小行星 (162173) Ryugu 是一颗 C 型近地小行星, 近日点距离大约为 0.963 AU, 自转周期 7.63 h。Ryugu 作为小行星采样返回任务 Hayabusa-2 的目标小行星, 一直受到较高的关注。Hayabusa-2 航天器发射于 2014 年 12 月, 按照计划, 该探测器 2018 年 6 月 27 日到达小行星 Ryugu, 并将于 2020 年采集样品返回地球。在此之前 Herchel<sup>[44]</sup>, AKARI<sup>[45]</sup>, Spitzer, Subaru-Comics<sup>[46]</sup> 等红外探测设备分别对 Ryugu 进行了探测。结合这些数据以及热物理模型, Müller 等人分别得到不同的表面热物理参数以及自转轴指向等相关参数。Yu 等人利用观测数据以及新建立的多面体形状模型对该小行星的相关热物理参数进行了计算<sup>[47]</sup>。表 1 列举了不同研究者得到的小行星 Ryugu 的热物理参数。

表 1 小行星 (162173) Ryugu 的理论热物理参数

$D_{\text{eff}}/\text{km}$	$p_v$	$\Gamma/\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$	热物理模型	参考文献
$0.92 \pm 0.12$	$0.063^{+0.020}_{-0.015}$	$> 500$	NEATM 和 TPM	[45]
$0.90 \pm 0.14$	$0.07 \pm 0.01$	$700 \pm 200$	TPM	[48]
$0.87 \pm 0.03$	$0.07 \pm 0.006$	$200 \sim 600$	TPM	[49]
$1.13 \pm 0.03$	$0.042 \pm 0.003$	$300 \pm 50$	ATPM	[47]

#### 4.5 小行星 (341843) 2008 EV5

Aten 型近地小行星 2008 EV5 是一颗光谱型为 C 并具有撞击地球可能性的小行星, 2008 年 3 月被发现, 目前该小行星是欧空局 (ESA) 小行星采样返回任务 Marco-Polo 的候选目标。作为该类目标, 人们首先要明确其表面物理性质, 如表面成分的粒径大小和热惯量等参数。从 2008 年其与地球近距离交会时通过雷达观测获得的高分辨率形状模型可以看出, 其表面具有陨石坑特性, 这有可能是由其他小天体撞击形成。此外, 通过该观测还得到其几何反照率为  $0.12 \pm 0.04$ <sup>[50]</sup>。Alí-Lagoa 等人<sup>[20]</sup>利用红外望远镜 WISE 的 W2, W3, W4 波段数据, 结合热物理模型 TPM, 通过拟合得到其热惯量为  $(450 \pm 60) \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ , 拟合结果见图 6; 利用 Gundlack 的热传导率模型, 得到其表壤粒径大小为  $(6.6 \pm 1.3) \text{mm}$ 。光学和近红外观测表明, 2008 EV5 表面具有较多含碳矿物。2008 EV5 目前被认为是起源于直径大于 100 km 的主带小行星, 由其母体小行星经过一系列事件后生成的碎片演化而来<sup>[51]</sup>。动力学模型表明, 2008 EV5 的轨道是经过长时间 (0.01 ~ 1 Ga) 的向内迁移, 而演化为现在的近地小行星轨道<sup>[52]</sup>。在其与母体分离后, Yarkovsky 和 YORP 效应同时对其造成影响, 例如 Yarkovsky 效应使其轨道参数发生变化, YORP 效应使其自转轴和自转速率发生改变, 在两者的长期影响下, 其形状亦可发生变化。2008 EV5 赤道凸起两极扁平的形状有可能是由 YORP 效应造成<sup>[53]</sup>。

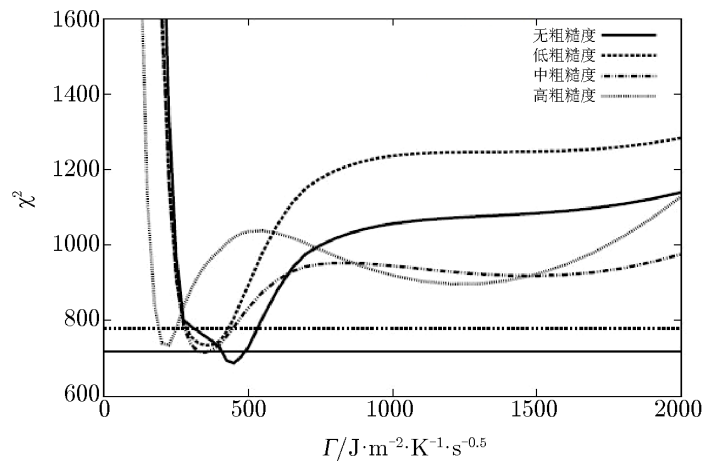


图 6 不同表面粗糙度对小行星 2008 EV5 红外辐射的观测值与理论值进行拟合  $\chi^2$  大小随热惯量的变化<sup>[20]</sup>

从图 6 中可以看出, 对应于不同的表面粗糙度,  $f_R = 0$  时,  $\chi^2$  值最小, 即拟合程度最好, 此时对应的  $\Gamma$  值大约为  $450 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

## 5 Yarkovsky 效应和 YORP 效应

Yarkovsky 效应和 YORP 效应都是由太阳光引起, 但作用的机制不同。Yarkovsky 效应是小行星吸收太阳辐射时所产生的光子力, 在小行星运行过程中会使其轨道半长径等参数发生改变。YORP 效应则是由于小行星不规则的形状使照射在上面的太阳光产生光子力矩, 使小行星的自转发生改变<sup>[54]</sup>, 如 YORP 效应能改变小行星的自转轴指向、自转速率和轨道倾角等。图 7 为 Yarkovsky 效应和 YORP 效应产生的机制。

这两种效应与小行星的热物理参数有密切的联系。在早期的 Yarkovsky 效应模型中, 人们做了诸多假设, 如小行星边界条件是线性的, 自转轴指向固定, 绕日公转轨道为圆轨道等。在这些假设下, 半长径的变化率分为两项, 即周日项和季节项<sup>[54]</sup>:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{diurnal}} = -\frac{8}{9} \frac{\alpha\Phi}{n} W(R_\omega, \Theta_\omega) \cos \gamma, \quad (9)$$

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{seasonal}} = -\frac{4}{9} \frac{\alpha\Phi}{n} W(R_n, \Theta_n) \sin^2 \gamma, \quad (10)$$

其中,  $\Phi = \frac{\pi R^2 F}{mc}$ ,  $R$  是目标天体的半径,  $F$  代表距离太阳为  $a$  (单位 AU) 处的小行星所接收到的太阳辐射流量,  $c$  为真空中光速;  $\alpha = 1 - A$ ,  $A$  表示邦德反照率;  $\Theta_\omega$ ,  $\Theta_n$  和  $W$  都是与小行星热物理参数有关的物理量, 当小行星体积较大时,  $W \simeq W(\Theta) = \frac{-0.5\Theta}{1 + \Theta + 0.5\Theta^2}$ ,  $\omega$  对应自转频率, 用于计算日项,  $n$  对应于轨道平运动, 用于计算季节项, 式中的  $\gamma$  表示自转轴倾角。

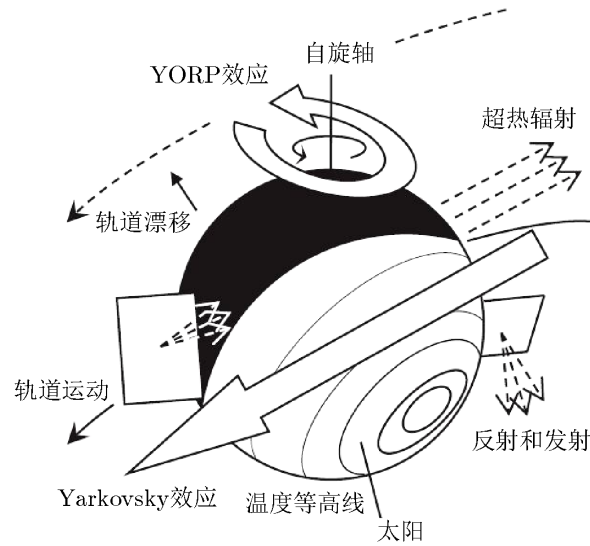


图 7 小行星 Yarkovsky 效应和 YORP 效应的原理图<sup>[14]</sup>

在早期 YORP 效应中, 人们没有考虑热传导的问题, 即假设所研究的天体热传导率为零。2010 年 Breiter 等人<sup>[55]</sup>在考虑了有限体积以及热传导的情况下研究了 YORP 效应, 提出了与 YORP 效应对应的一种理论模型, 并对小行星 1998 KY26 进行了模拟。2012 年, Rozitis 和 Green<sup>[14]</sup>利用热物理模型 ATPM, 将 Yarkovsky 效应和 YORP 效应结合起来进行研究。ATPM 模型考虑了粗糙的表面太阳散射以及重吸收的影响, 因此能更好地模拟太阳光入射到小行星表面之后的反射和散射等行为。

在 Roziti 和 Green 的两种效应模型中, 利用热物理模型 ATPM, 人们可以得到小行星表面的温度分布, 即在形状模型中每个面元上的温度值, 以及这些面元所发出的热辐射  $E_i$ 。根据 Rozitis 和 Green 的理论, 在不考虑面元之间的自加热效应时, 假设反射的太阳光是朗伯辐射, 则在光滑面上, 每个面元所受到的光子反冲力为:

$$\mathbf{p}_i(\tau) = -\frac{2E_i(\tau)a_i}{3c}\mathbf{n}_i(\tau) \quad , \quad (11)$$

其中,  $a_i$  为面元  $i$  的面积,  $\mathbf{n}_i$  代表每个面元的法向量。由其他面元反射到面元  $i$  上的辐射而产生的光子力为:

$$\mathbf{q}_{i,j}(\tau) = \frac{E_i(\tau)a_i}{c}\mathbf{f}_i\mathbf{f}_{i,j}(\tau) \quad , \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{f}_{i,j}$  为面元  $i$  到面元  $j$  方向的单位矢量。将式 (11) 和式 (12) 相加, 即得光滑面面元  $i$  上总的光子力:

$$\mathbf{p}_i(\tau) = -\frac{2E_i(\tau)a_i}{3c}\mathbf{n}_i(\tau) + \sum_{j \neq i} \mathbf{q}_{i,j}(\tau) \quad . \quad (13)$$

而对于粗糙面的光子力, 需要在粗糙面坐标系中进行计算:

$$\mathbf{p}_{\text{rough,SR},k} = \sum_{l=1}^M \mathbf{p}_{\text{SR},k,l}(\tau) . \quad (14)$$

该光子力可从粗糙面坐标系转换到黄道面坐标系, 这样, 小行星上面元  $k$  所受到的总的光子力, 可通过对光滑面的总光子力和粗糙面的总光子力进行加权得到:

$$\mathbf{p}_{\text{total,HE},k}(\tau) = (1 - f_{\text{R},k})\mathbf{p}_{\text{smooth,HE},k}(\tau) + f_{\text{R},k}\mathbf{p}_{\text{rough,HE},k}(\tau) , \quad (15)$$

其中,  $f_{\text{R}}$  是表面粗糙度。面元  $k$  所受到的总的光子力矩为:

$$\varphi_{\text{total,HE},k}(\tau) = \mathbf{r}_k \times \mathbf{p}_{\text{total,HE},k}(\tau) . \quad (16)$$

有了光子力和光子力矩, 小行星的轨道半长径变化率以及自转轴的变化均可求出。对于 Yarkovsky 效应, 有:

$$\frac{da}{dt} = \frac{2a^2}{P_{\text{ORB}}GM_{\text{sun}}M_{\text{ast}}}\Delta E , \quad (17)$$

其中,  $P_{\text{ORB}}$  为小行星绕日公转的周期,  $G$  是引力常数,  $M_{\text{sun}}$  是太阳质量,  $M_{\text{ast}}$  是小行星质量,  $\Delta E$  为小行星在一个轨道周期内能量的变化。而对于 YORP 效应, 如果小行星轨道面为圆, 且自转轴指向垂直于轨道面, 则轨道面可分为 3 个分量, 分别是: 自转速率的变化、轨道倾角的变化以及黄经的进动:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\boldsymbol{\Phi}_i \cdot \mathbf{d}}{C_\omega} , \quad (18)$$

$$\frac{d\xi_i}{dt} = \frac{\boldsymbol{\Phi}_i \cdot \mathbf{d}_{\perp 1}}{C_\omega \omega} , \quad (19)$$

$$\frac{d\lambda_i}{dt} = \frac{\boldsymbol{\Phi}_i \cdot \mathbf{d}_{\perp 2}}{C_\omega \omega} , \quad (20)$$

其中,  $\boldsymbol{\Phi}_i$  代表在某个轨道位置上的总力矩,  $C_\omega$  代表小行星绕最短轴的惯量矩。如果小行星的轨道是椭圆形, 且自转轴指向并不垂直于轨道面, 则可在轨道上各个位置求上述 3 个分量的值, 然后进行平均:

$$\frac{dY}{dt} = \frac{1}{P_{\text{ORB}}} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \frac{dY_i}{dt} . \quad (21)$$

利用该理论, Rozitis 和 Green 研究了小行星自身参数对 Yarkovsky 效应和 YORP 效应大小的影响。通过对小行星 (1620)Geographos 和 (6489)Golevka 进行计算, 发现粗糙表面的热红外集束效应会对 Yarkovsky 效应有加强作用, 而对 YORP 效应有减弱的作用。同时, 在该模型中小行星表面的粗糙度由凹坑来表征。通过研究发现, Yarkovsky 效应与凹坑在表面的分布无关, 只与凹坑的倾斜角有关; YORP 效应对凹坑在小行星表面的分布较为敏感, 所以在精确预测小行星的 YORP 效应时, 需要知道精确的形状模型。图 8 给出了小行星 (1620)Geographos 的 Yarkovsky 效应和 YORP 效应随着不同参数的变化情况。其中, 图 8a) 和图 8b) 分别给出了在不同表面粗糙度 (邦德反照率分别为 0.1, 0.3, 0.5) 和不同日心距

(分别为 1, 1.246, 2, 3, 4 AU) 下小行星的 Yarkovsky 效应随热惯量的变化趋势; 图 8c) 给出了 Yarkovsky 效应日项和季节项随轨道倾角的变化情况, 其中季节项放大  $-100$  倍; 图 8d) 给出了 YORP 效应引起的自转加速度随倾角的变化情况<sup>[14]</sup>。

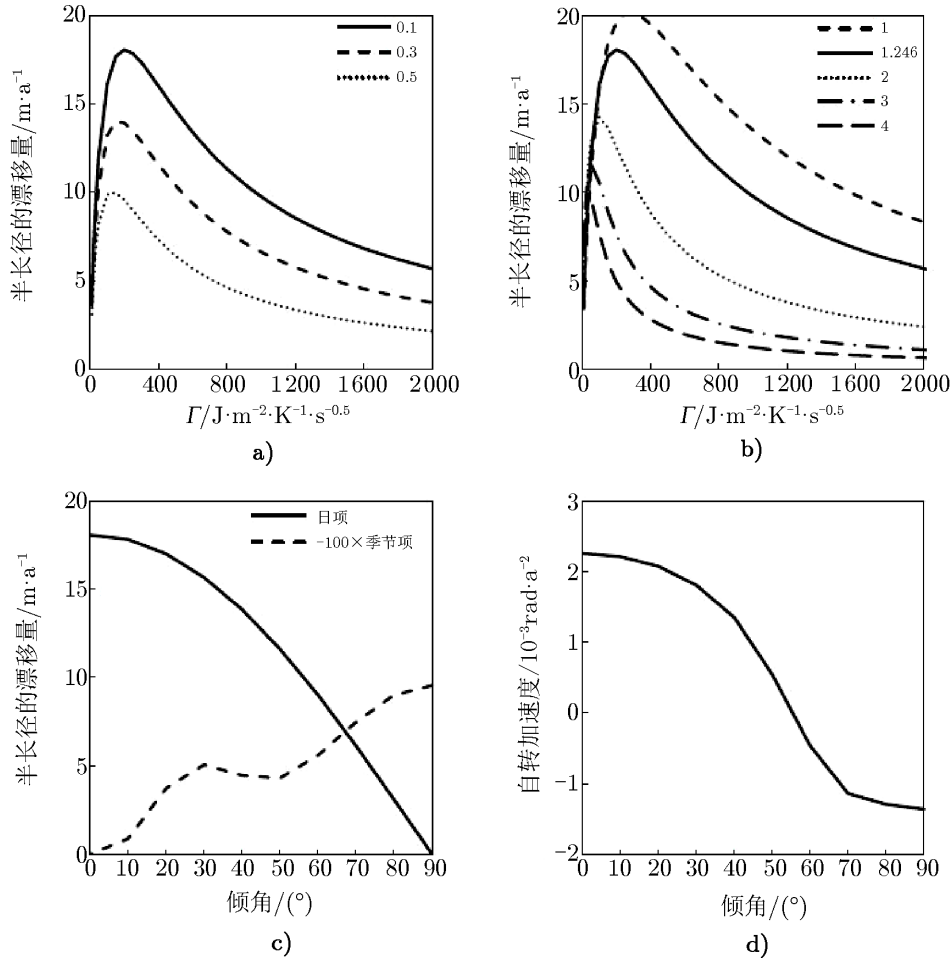


图 8 Yarkovsky 效应和 YORP 效应的参数敏感度<sup>[14]</sup>

表 2 列出了截至 2014 年观测到 Yarkovsky 效应的小行星 (信噪比高于 3.0)。2017 年, Adam 和 Jean-Luc<sup>[56]</sup> 利用雷达观测数据得到小行星 (1566)Icarus 的 Yarkovsky 效应, 其半长径变化率为  $-4.62 \times 10^{-4} \text{ AU}\cdot\text{Ma}^{-1}$ 。Carruba 等人<sup>[57]</sup> 则对 Veritas 族群中 274 颗小行星的 Yarkovsky 效应进行了研究 [Veritas 族群小行星即由于受到轨道平运动共振而导致偏心率发生混沌发散的小行星类群, 典型代表为小行星 (490)Verita<sup>[58]</sup>], 发现其  $da/dt$  的分布情况与低密度且低热传导率的 C 类小行星类似, 但由于受到谷神星等大行星的扰动, 无法得到单个小行星精确的  $da/dt$  值。

表 2 已观测到 Yarkovsky 效应的小行星<sup>[13, 60, 61]</sup>

天体	$r/\text{AU}$	$H/\text{mag}$	$D/\text{m}$	$\frac{da}{dt}/(10^{-4} \text{ AU} \cdot \text{Ma}^{-1})$	信噪比
(101955)Bennu	1.10	20.6	493	$-18.95 \pm 0.10$	194.6
(2340)Hathor	0.75	20.2	210	$-17.38 \pm 0.70$	24.9
(152563)1992 BF	0.87	19.7	510	$-11.82 \pm 0.56$	21.0
2009 BD	1.01	28.2	4	$-489 \pm 35$	13.9
2005 ES70	0.70	23.7	61	$-68.9 \pm 7.9$	8.7
(4179)Toutatis	1.96	15.1	2 800	$-3.75 \pm 0.45$	8.4
(2062)Aten	0.95	17.1	1300	$-6.60 \pm 0.80$	8.3
1999 MN	0.50	21.4	175	$54.6 \pm 6.8$	8.1
(6489)Golevka	2.01	19.1	280	$-4.52 \pm 0.60$	7.5
(1862)Apollo	1.22	16.3	1 400	$-1.58 \pm 0.24$	6.5
2006 CT	1.07	22.3	119	$-47.6 \pm 7.7$	6.2
(3908)Nyx	1.71	17.3	1 000	$9.6 \pm 1.7$	5.8
2000 PN8	1.22	22.1	130	$49.3 \pm 8.7$	5.7
(162004)1991 VE	0.67	18.1	827	$19.2 \pm 3.6$	5.3
(10302)1989 ML	1.26	19.4	248	$38.7 \pm 7.5$	5.2
(2100)Ra-Shalom	0.75	16.1	2 240	$-5.8 \pm 1.2$	4.7
(29075)1950 DA	1.46	17.1	1 300	$-2.70 \pm 0.57$	4.7
(85953)1999 FK21	0.53	18.0	590	$-11.0 \pm 2.4$	4.5
(363505)2003 UC20	0.74	18.2	765	$-4.5 \pm 1.0$	4.5
2004 KH17	0.62	21.9	197	$-42.0 \pm 9.8$	4.3
(66400)1999 LT7	0.70	19.4	411	$-35.0 \pm 8.3$	4.2
1995 CR	0.45	21.7	100	$-314 \pm 76$	4.2
(4034)Vishnu	0.95	18.3	420	$-31.8 \pm 8.0$	4.0
(85774)1998 UT18	1.33	19.1	900	$-2.45 \pm 0.63$	3.9
1994 XL1	0.57	20.8	231	$-37.6 \pm 9.8$	3.8
(3361)Orpheus	1.14	19.0	348	$6.2 \pm 1.7$	3.8
(377097)2002 WQ4	1.63	19.5	422	$-9.6 \pm 2.6$	3.7
(138852)2000 WN10	0.97	20.1	328	$17.7 \pm 4.9$	3.6
(399308)1999 GD	1.07	20.8	180	$47 \pm 13$	3.5
(4581)Asclepius	0.96	20.7	242	$-19.7 \pm 5.7$	3.5
2007 TF68	1.36	22.7	100	$-60 \pm 18$	3.4
1999 FA	1.07	20.6	300	$-43 \pm 13$	3.3
(2063)Bacchus	1.01	17.2	1 200	$-6.6 \pm 2.0$	3.2
(350462)1998 KG3	1.15	22.2	125	$-25.2 \pm 7.9$	3.2
(256004)2006 UP	1.51	23.0	85	$-67 \pm 21$	3.1
(37655)Illapa	0.97	17.8	950	$-10.3 \pm 3.5$	3.0
(1620)Geographos	1.16	15.6	2560	$-2.5 \pm 0.6$	3.85
(6037)1988 EG	1.10	18.7	650	$-14.2 \pm 4.3$	3.34
(1036)Ganymed	2.26	9.45	31 660	$-6.6 \pm 1.5$	4.41

(续表)

天体	$r/\text{AU}$	$H/\text{mag}$	$D/\text{m}$	$\frac{da}{dt}/(10^{-4} \text{ AU} \cdot \text{Ma}^{-1})$	信噪比
(4179)Tutatis	1.96	15.3	5 400	$-18.4 \pm 4.3$	8.33
(154330)2002 VX94	1.35	18.1	900	$70.2 \pm 20.6$	3.42
(1685)Toro	1.10	14.23	3 000	$-1.27 \pm 0.34$	0.37
(54509)YORP	0.97	22.7	100	$-33.6 \pm 10.61$	3.2
(283457)2001 MQ3	1.98	18.9	—	$-16.02 \pm 5.14$	3.1
(65679)1989 UQ	0.88	19.3	730	$-17.51 \pm 5.84$	3.0

Golubov 等人<sup>[59]</sup>提出了新的物理模型来计算正常的 YORP 效应和 Yarkovsky 效应的日项, 该模型考虑了早期将热传导率看作零的假设, 也考虑了低热惯量和高热惯量的情况 (较高热传导率)。由于 YORP 效应的探测较困难, 故观测到 YORP 效应的小行星数目较少。表 3 给出了已探测到 YORP 效应的小行星。

表 3 已探测到 YORP 效应的小行星

天体	$\frac{d\omega}{dt}/10^{-8} \text{ AU} \cdot \text{Ma}^{-1}$	$H/\text{mag}$	$P/\text{h}$	$\gamma/(\circ)$	$r/\text{AU}$	参考文献
(54509)YORP	$350 \pm 35$	22.6	0.203	173	0.98	[62, 63]
(25143)Itokawa	$3.5 \pm 0.4$	18.9	12.132	178	1.27	[64]
(1620)Geographos	$1.2 \pm 0.2$	15.6	5.223	152	1.18	[65]
(1862)Apollo	$5.5 \pm 1.2$	16.3	3.065	162	1.22	[66, 67]
(3103)Eger	$1.4 \pm 0.6$	15.3	5.710	176	1.32	[68]
(1865)Cerberus	$< 0.8$	16.8	6.803	178	0.96	[68]
(2100)Ra-shalom	$-5.98 \sim 2.03$	16.05	19.79	15.76	0.75	[69]

## 6 总结与展望

本文介绍了小行星热物理方面的研究内容, 讨论了在研究过程中使用到的热物理模型、形状模型、红外观测, 以及在实际应用中所计算的 Yarkovsky 效应和 YORP 效应。在热物理模型的章节中, 着重讨论了 ATPM 模型, 因为该模型考虑了粗糙面的入射太阳光集束效应, 使用较精确的形状模型并与热物理机制有效地结合起来。与其他热物理模型相比, ATPM 具有更多优点, 因此在小行星热物理的研究过程中发挥着更重要的作用。在 Yarkovsky 效应和 YORP 效应的研究中, 正如本文第 5 章所述, Roziti 和 Green 利用 ATPM 给出了一套较为完备的研究这两种效应的方法。无论是 ATPM 还是 TPM, 或者其他的简单热物理模型, 人们在研究过程中都需要红外望远镜的观测支持。除了发射较早的红外卫星, NEOWISE 自 2010 年发射以来, 已进入任务的收尾阶段, 后续的红外卫星, 也会产出部分对小行星的红外



观测结果, 从而为后面的小行星热物理研究工作提供更多数据。此外, 除了近地小行星, 主带小行星也是重要的研究对象。在前期的工作中, 人们获得了大量的主带小行星的形状模型以及红外观测数据, 这些模型和观测资料为研究小行星的热物理参数提供了重要保障。如 Yu 等人<sup>[70]</sup>采用 ATPM 模型以及多个望远镜的观测数据 (包括 IRAS, AKARI, WISE 及 Subaru) 对主带小行星 (349) Dembowska 的热物理进行了研究。

对于 Yarkovsky 效应和 YORP 效应, 本文着重讨论了基于 ATPM 模型下的一种计算方法, 但并未考虑形状模型中面元之间的相互加热效应。Rozitis 和 Green 在 2013 年对他们所提出的理论进行了完善, 考虑了小行星表面的自加热效应 (self-heating effect), 从而得到更精确的 Yarkovsky 效应和 YORP 效应的理论值<sup>[71]</sup>。但从观测上来讲, 已观测到这两种效应的小行星数量并不多, 尤其是 YORP 效应, 很难从观测资料中得到该效应的观测值, 因此, 在今后的工作中, 还需要将观测与理论结合起来, 形成更加完备的理论模型。另外, 除了太阳光能够对小行星产生作用力矩, 在形状不规则的双小行星系统中, 也会有类似的力矩产生, 从而改变小行星的自转状态, 进而使双小行星互相远离或者互相靠近, 这种效应称为 BYORP 效应 (binary YORP effect)。BYORP 效应最初是由 Čuk 和 Burns 提出<sup>[72]</sup>, McMahon 和 Scheeres 对 Čuk 和 Burns 的理论进行了完善, 提出了 BYORP 效应的一个分析模型<sup>[73]</sup>, 并在小行星 (66391) 1999 KW4 上进行了应用<sup>[74]</sup>。

热物理模型 ATPM 也存在缺点, 它在计算小行星表面的热传导时仅考虑了一维热传导, 对于小行星的高纬度地区, 用这种简单的假设并不能准确地得到其温度分布情况, 而需要考虑横向即三维热传导。此外, ATPM 所计算得到的热惯量只是一个平均热惯量, 并没有考虑季节性的热惯量变化情况。有的小行星, 如 (3200)Phaethon, 其偏心率高达 0.89, 近日点距离只有 0.14 AU, 在距离太阳如此近的情况下, 极高的温度会对小行星表面的物质状态产生影响, 从而有可能使小行星的热惯量等热物理参数发生改变。在使用 ATPM 计算理论辐射通量时, 假定了小行星表面的热传导率是恒定的, 但真实情况下热传导率会随着温度的变化而改变。因此, 在未来的研究中, 该模型也有待进一步完善, 从而使其能更广泛地应用于小行星的热物理研究当中。

## 参考文献:

- [1] Delbo M, Mueller M, Emery J, et al. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015: 107
- [2] Lebofsky L A, Sykes M V, Tedesco E F, et al. Icarus, 1986, 68: 239
- [3] Lebofsky L A, Spencer J R. Asteroids II. Tucson: University of Arizona Press, 1989: 128
- [4] Harris A W. Icarus, 1998, 131: 291
- [5] Lagerros J S V. A&A, 1996, 310: 1011
- [6] Horner J, Müller T G, Lekawka P S. MNRAS, 2012, 423: 2587
- [7] <http://iras.ipac.caltech.edu/Missions/wise.html>, 2018
- [8] Hanuš J, Delbo M, Vokrouhlický D, et al. A&A, 2016, 592: A34
- [9] Mainzer A, Bauer J, Cutri R M, et al. ApJ, 2014, 792: 30
- [10] Lagerros J S V. AA, 1998, 332: 1123

- [11] 余亮亮, 季江徽. 天文学进展, 2013, 31: 2
- [12] Rozitis B, Green S F. MNRAS, 2011, 415: 2042
- [13] Vokrouhlický D, Bottke W F. Asteroid IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015: 509
- [14] Rozitis B, Green S F. MNRAS, 2012, 423: 367
- [15] Mainzer A, Usui F, Trilling D E. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015: 150
- [16] Neugebauer G, Habing H J, van Duinen R, et al. ApJ, 1984, 278: L1
- [17] <http://darts.isas.jaxa.jp/ir/akari/catalogue/AcuA.html>, 2018
- [18] Wright E L, Eisenhardt P, Mainzer A, et al. ApJ, 2010, 140: 1868
- [19] Mainzer A, Bauer J, Grav T, et al. ApJ, 2014, 784: 110
- [20] Alí-Lagoa V, Lionni L, Delbo M, et al. A&A, 2014, 561: A45
- [21] Müller T G, Kiss C, Scheirich P, et al. A&A, 2014, 566: A22
- [22] Emery J P, Fernández Y R, Kelly M S P, et al. Icarus, 2014, 234: 17
- [23] 李彬. 硕士学位论文. 南京: 中国科学院紫金山天文台, 2012: 7
- [24] Kaasalainen M, Torppa J. Icarus, 2001, 153: 24
- [25] <http://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/asteroids3D/web.php>
- [26] Ostro S J, Campbell D B, Chandler J F, et al. AJ, 1991, 102: 1490
- [27] 张翔, 季江徽. 天文学进展, 2014, 32: 1
- [28] Hudson R S, Ostro S J. Icarus, 1999, 140: 369
- [29] <https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/shapes/shapes.html>, 2018
- [30] Yu L L, Ji J H. MNRAS, 2015, 452: 368
- [31] Wolters S D, Rozitis B, Duddy S R, et al. MNRAS, 2011, 418: 1246
- [32] Licandro J, Müller T G, Alvarez C. et al. A&A, 2016, 585: A10
- [33] Yu L L, Ji J H, Ip W H. Research in Astronomy and Astrophysics, 2017, 17: 70
- [34] Mottola S, Lahulla F. Icarus, 2000, 146: 556
- [35] Scheirich P, Pravec P. Icarus, 2009, 78: 337
- [36] León J, Mothé D, Licandro J, et al. A&A, 2011, 530: L12
- [37] Patrick M, Luisa-M L, Bernard M, et al. Highlights of Astronomy, 2015, 16: 2540
- [38] Yu L L, Ji J H, Wang S. MNRAS, 2014, 439: 3357
- [39] Walsh K J, Delbo M, Mueller M, et al. ApJ, 2012, 748: 104
- [40] Mueller M, Delbo' M, Hora J L, et al. AJ, 2011, 141: 109
- [41] Nolan M C, Christopher H E, Benner L A M, et al. Icarus, 2013, 226: 629
- [42] Müller T G, O'Rourke L, Barucci A M, et al. A&A, 2012, 548: A36
- [43] Okada T, Fukuhara T, Tanaka S, et al. Space Sci, 2016, 208: 255
- [44] Pilbratt G L, Riedinger J R, Passvogel T, et al. A&A, 2010, 518: L1
- [45] Hasegawa S, Müller T G, Kawakami K, et al. PASJ, 2008, 60: 339
- [46] Müller T G, Durech J, Ishgura M, et al. A&A, 2017, 599: A103
- [47] Yu L L, Ji J H, Wang S. Chin Astro Astropy, 2014, 38: 317
- [48] Campins H, Emery J P, Kelly M, et al. A&A, 2009, 503: L17
- [49] Müller T G, Durech J, Hasegawa S, et al. A&A, 2011, 525: A145
- [50] Busch M M, Ostro S J, Benner L A M, et al. Icarus, 2011, 212: 649
- [51] Morbidelli A, Bottke W, Nesvorný D, et al. Icarus, 2009, 204: 558
- [52] Mazanek D, Reeves D, Abell P A, et al. Asteroid Redirect Mission(ARM) Formulation Assessment and Support Team(FAST) Final Report. Langleg: Langley Research Center, 2016
- [53] Walsh K, Richardson D, Derek C, et al. Nature, 2008, 454: 188
- [54] Bottke W, Vokrouhlický D, Rubincam D P, et al. Earth Planet Sci, 2006, 34: 157
- [55] Breiter S, Vokrouhlický D, Nesvorný D. MNRAS, 2010, 401: 1933
- [56] Adam H, Jean-Luc M. AJ, 2017, 153: 108
- [57] Carruba V, Vokrouhlický D, Nesvorný D. MNRAS, 2017, 469: 4400
- [58] Nesvorný D, Brož M, Carruba V, et al. Asteroid IV, Tucson: University of Arizona Press, 2015: 297

- [59] Golubov O, Kravets Y, Krugly Y N, et al. MNRAS, 2016, 458: 3977
- [60] Farnocchia D, Chesley S R, Vokrouhlický D, et al. Icarus, 2013, 224: 1
- [61] Nugent C R, Margot J L, Chesley S R, et al. ApJ, 2012, 144: 60
- [62] Lowry S C, Pravec P, Vokrouhlický D, et al. Science, 2007, 316: 272
- [63] Taylor P A, Margot J L, Vokrouhlický D, et al. Science, 2007 316: 274
- [64] Lowry S C, Weissman P R, Duddy S R, et al. A&A, 2014, 562: A48
- [65] Āurech J, Vokrouhlický D, Kaasalainen M, et al. A&A, 2008, 489: L25
- [66] Āurech J, Vokrouhlický D, Kaasalainen M, et al. A&A, 2008, 488: 345
- [67] Kaasalainen M, Āurech J, Warner B D, et al. Nature, 2007 466: 420
- [68] Āurech J, Vokrouhlický D, Merline W J, et al. A&A, 2012, 547: A10
- [69] Rozitis B, Green S F. MNRAS, 2013, 430: 1376
- [70] Yu L L, Yang B, Ji J H, et al. MNRAS, 2017, 472: 2388
- [71] Rozitis B, Green S F. MNRAS, 2013, 433: 603
- [72] Āuk M, Burns J A. Icarus, 2005, 176: 418
- [73] McMahon J, Scheeres D J. Astron, 2010, 106: 261
- [74] McMahon J, Scheeres D J. Icarus, 2010, 209: 494

## The Review of Thermophysics, Yarkovsky and YORP Effects for Asteroids

JIANG Hao-xuan<sup>1,2</sup>, JI Jiang-hui<sup>1,3</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China; 3. CAS Key Laboratory of Planetary Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The thermophysical investigation of asteroids plays an important role in understanding their behaviors in recent years. In this paper, we introduced the different thermal models used in this field, and summarized the major results of the thermal properties of several asteroids by using these thermal models. We further briefly mentioned the shape model and mid-infrared observations of asteroid. Using these thermal models combined with observation data from ground-based or space telescope, we can obtain the thermal parameters of asteroids such as thermal inertia, geometric albedo, effective diameter, roughness fraction, surface temperature, and so on. These parameters can be further adopted to explore the Yarkovsky effect and YORP effect of the asteroids, which can help us predict the orbital evolution and learn about their accurate spin state, providing detailed information for those space missions to asteroids.

**Key words:** asteroid; thermalphysical; model; infrared observations; Yarkovsky effect; YORP effect