

潜在威胁小行星矿物定量反演

黄海涛^{1,2}, 吴昀昭^{1,3}, 王立^{4,5}, 矫恒越^{1,2}, 李彦昭³, 雷开宇^{4,5}

(1. 中国科学院紫金山天文台 行星科学重点实验室, 南京 210023; 2. 中国科学技术大学 天文与空间科学学院, 合肥 230026;
3. 澳门科技大学 太空科学研究所, 澳门 999078; 4. 北京控制工程研究所, 北京 100094;
5. 光电测量与智能感知中关村开放实验室, 北京 100190)

摘要: 针对潜在威胁小行星 (Potentially Hazardous Asteroids, PHAs) 的撞击风险与防御方案的制定, 采用修正高斯模型 (Modified Gaussian Model, MGM) 研究其矿物组成, 进而与陨石类似物建立联系。该模型通过对混合物光谱去卷积获得矿物单独吸收特征。将MGM应用到6颗PHAs中, 结果表明6颗PHAs分别是S型、Sq型和Q型, 矿物主要由橄榄石、低钙辉石和高钙辉石组成, 镁橄榄石指数 (Fo#) 为0.68~0.76, 高钙辉石占比为0.215~0.395。小行星 (25143) Itokawa、(1620) Geographos、(99942) Apophis和 (1862) Apollo对应的陨石类似物为LL球粒陨石, 小行星 (11500) Tomaiyowit和 (4179) Toutatis与L球粒陨石相似。

关键词: 潜在威胁小行星; 光谱; 矿物; 普通球粒陨石

中图分类号: P185

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)06-0605-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20240052

引用格式: 黄海涛, 吴昀昭, 王立, 等. 潜在威胁小行星矿物定量反演[J]. 深空探测学报 (中英文), 2024, 11 (6): 605-612.

Reference format: HUANG H T, WU Y Z, WANG L, et al. Quantitative inversion of minerals on potentially hazardous asteroids[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11 (6): 605-612.

引言

截至2024年8月2日, 全球已发现的近地天体 (Near Earth Objects, NEOs) 超过3.5万颗, 其中2433颗被国际天文联合会 (International Astronomical Union, IAU) 所属的小行星中心 (Minor Planet Center, MPC) 列为“潜在威胁小行星 (Potentially Hazardous Asteroids, PHAs)”。PHAs是指直径超过140 m, 与地球轨道最近距离小于0.05 AU的天体^[1]。包括PHAs在内的NEOs在路过地球时可能被地球引力捕获, 改变运行轨道奔向地球直至相撞^[2]。如2013年2月15日, 一颗直径约15 m的小行星在俄罗斯车里雅宾斯克地区上空爆炸。该撞击事件造成1600余人受伤, 1000多间房屋受损, 经济损失达10亿卢布^[3]。PHAs撞击地球概率虽小但危害极大, 足够大的直径允许其穿越大气层产生空爆, 或撞击地表引发地震、海啸、火山喷发, 甚至导致全球性生物灭绝和文明消失^[4]。基于反射光谱的矿物丰度定量反演可获得PHAs矿物组成, 为PHAs制定防御应对方案在提供物质成分方面提供支撑信息。

基于反射光谱推测小行星矿物组成并与陨石类似物建立联系的方法有多种。Binzel等^[5]使用Shkuratov散射

模型得到 Apophis表面橄榄石丰度0.7 (镁橄榄石指数 Fo# = 0.7)、低钙辉石丰度0.22、高钙辉石丰度0.08。综合其矿物反演结果, Binzel等^[5]认为该小行星矿物组成与LL球粒陨石相似。Reddy等^[6]根据 (4179) Toutatis光谱吸收中心和波段面积比 (Band Area Ratio, BAR) 计算得到橄榄石丰度 0.61 ± 0.03 , 橄榄石和辉石平均化学成分分别为Fa = 20.2 ± 1.3 、Fs = 17.4 ± 1.4 , 认为 (4179) Toutatis矿物组成与L球粒陨石一致。Wang等^[7]使用其开发的硅质小行星矿物模型对 (99942) Apophis矿物组成进行了研究, 得到的结果是橄榄石和辉石矿物丰度分别为 53.4 ± 6 wt%和 35.6 ± 2 wt%, 即 (99942) Apophis小行星对应的陨石类似物为LL球粒陨石。

本研究对PHAs矿物组成开展了研究, 利用修正高斯模型 (Modified Gaussian Model, MGM) 反演得到镁橄榄石丰度及低钙辉石和高钙辉石占比, 并识别它们的陨石类似物。对PHAs的矿物组成与陨石类似物研究有助于为建立防御机制提供基础支撑。

1 数据与方法

1.1 可见光近红外光谱数据

本文拟对大量PHAs开展研究, 但由于PHAs观测

收稿日期: 2024-07-20 修回日期: 2024-10-30

基金项目: 光电测量与智能感知中关村开放实验室开放基金 (LabSOMP-2024-04); 空间碎片与近地小行星防御 (KJSP2023020105)

难度大, 高质量光谱数据少, 通过筛选最终确定对6颗具有高质量覆盖可见近红外谱段 (Visible and Near-Infrared, VNIR) 的PHAs进行研究。这6颗小行星 ((25143) Itokawa、(1620) Geographos、(99942) Apophis、(1862) Apollo、(11500) Tomaiyowit和Toutatis)) 的可见光-近红外光谱从麻省理工学院-夏威夷近地天体光谱研究 (MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey, MITHNEOS) 项目获得。其中可见光数据来自小型主带小行星光谱研究 (Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey, SMASS) 项目, 该项目采用美国亚利桑那州密歇根达特茅斯麻省理工学院 (Michigan Dartmouth MIT, MDM) 天文台的希尔特纳望远镜 (Hiltner telescope) 进行观测^[8]。光谱以2.5 nm分辨率覆盖0.50~0.92 μm。近红外光谱由SpeX仪器观测得到, SpeX仪器是位于莫纳克亚山美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的红外望远镜 (Infrared Telescope Facility, IRTF)^[9]。更多观测信息可参阅MITHNEOS网站 (<http://www.smass.mit.edu/minus.html>)。

1.2 光谱参数计算

上述小行星可见光和近红外在重叠波段具有相同的光谱趋势, 对重叠波段反射率比值求平均可得到调整因子^[10]。将近红外数据乘以调整因子并连接可见光非重叠区域获得完整的光谱曲线。

光谱波段参数包含1 μm和2 μm附近的波段I中心 (Band I Center, BIC) 和波段II中心 (Band II Center, BIIC) 以及由波段II面积与波段I面积之比得到的波段面积比 (Band Area Ratio, BAR)^[11-13]。具体计算步骤如下: 首先分别假设光谱极值在0.6~0.8 μm、0.8~1.2 μm、1.3~1.7 μm、1.8~2.2 μm, 对上述区域用3~8阶多项式函数拟合光谱 (以卡方最小为最优)。光谱最小值和最大值是拟合多项式函数一阶导为0的点。连接光谱最大值和2.45 μm处的反射率得到两个线性连续统, 通过将光谱相应区域除以两条连续统来去连续统。去除连续统后, 计算波段中心的方法与计算波段最小值的方法类似^[14]。

波段I面积位于第一和第二最大值之间, 波段II面积位于第二最大值和2.45 μm之间。通过计算由梯形定义的相邻连续点之间的面积, 并将所有这些与吸收带对应的面积累加得到波段I与波段II面积^[14]。

1.3 小行星热物理模型

本研究使用近地小行星热模型 (Near-Earth Asteroids Thermal Model, NEATM) 计算小行星总体温度^[15]。

NEATM中小行星日下点温度

$$T_{ss} = \left[\frac{S(1-A)}{\sigma \epsilon \eta r^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

其中: S 为太阳常数; σ 为Stefan-Boltzmann常数; ϵ 为发射率; A 为邦德反照率; r 为小行星到太阳的距离; η 为热集束参数。

NEATM将小行星表面的热辐射视为朗伯辐射, 因此小行星表面经验温度分布为

$$T(\theta, \phi) = T_{ss} \cos^{\frac{1}{4}}(\theta) \cos^{\frac{1}{4}}(\phi) \quad (2)$$

其中: θ 和 ϕ 分别为小行星上的点与日下点之间的纬度与经度的方向角距离。

对小行星上观测者可见的每个面元发射的热辐射进行数值积分得到观测者在距小行星距离为 d 时接收的红外辐射通量

$$F_{\text{NEATM}}(\lambda) = \frac{\epsilon D^2}{4d^2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\alpha-\frac{\pi}{2}}^{\alpha-\frac{\pi}{2}} B[\lambda, T(\theta, \phi)] \cos^2(\phi) \cos(\alpha - \theta) d\phi d\theta \quad (3)$$

其中: D 为小行星直径; ϵ 为发射率; d 为小行星到观测者的距离; α 为相位角; $B(\lambda, T)$ 为普朗克黑体辐射公式。

根据维恩位移定律计算小行星表面温度

$$T = \frac{b}{\lambda} \quad (4)$$

其中: b 为维恩位移常量。

对目标小行星进行温度计算所需的参数包括几何反照率 p_v 、相位因子 G 、日心距 r 、相位角 α 、观测距离 d 、发射率 ϵ 和热集束参数 η , 具体见表1。

表1 6颗PHAs的热物理参数
Table 1 Thermal Physical parameters for six PHAs

小行星	$\alpha / (^\circ)$ ^a	r / AU ^a	e / AU ^a	H	Pv ^a	G	ϵ ^b	η ^b
(25143) Itokawa	38.53	1.58	1.13	19.26	0.27	0.15	0.9	1.13
(11500) Tomaiyowit	68.47	0.80	0.95	18.37	0.14	0.15	0.9	1.42
(4179) Toutatis	7.54	3.06	3.93	15.31	0.41	0.10	0.9	0.83
(1620) Geographos	24.06	1.59	0.72	15.27	0.29	0.15	0.9	0.99
(99942) Apophis	30.67	1.07	1.76	19.01	0.35	0.25	0.9	1.06
(1862) Apollo	46.02	1.12	1.38	16.08	0.25	0.09	0.9	1.20

注: a表示资料来源于<https://www.astorb.com/>; b表示资料来源于文献^[16]。

1.4 修正高斯模型

本文使用MGM反演PHAs矿物组成, 基于矿物吸收特征通过高斯分布的假设对混合物光谱去卷积, 获得矿物单独吸收特征的模型^[17-18]。MGM模型具有不依赖先验知识、不受颗粒大小影响的优点, 已被广泛用于月球、小行星、火星等矿物组成研究^[19-23]。

在MGM中, 小行星拟合反射光谱由对数空间的一个连续统和数个高斯峰组成, 即

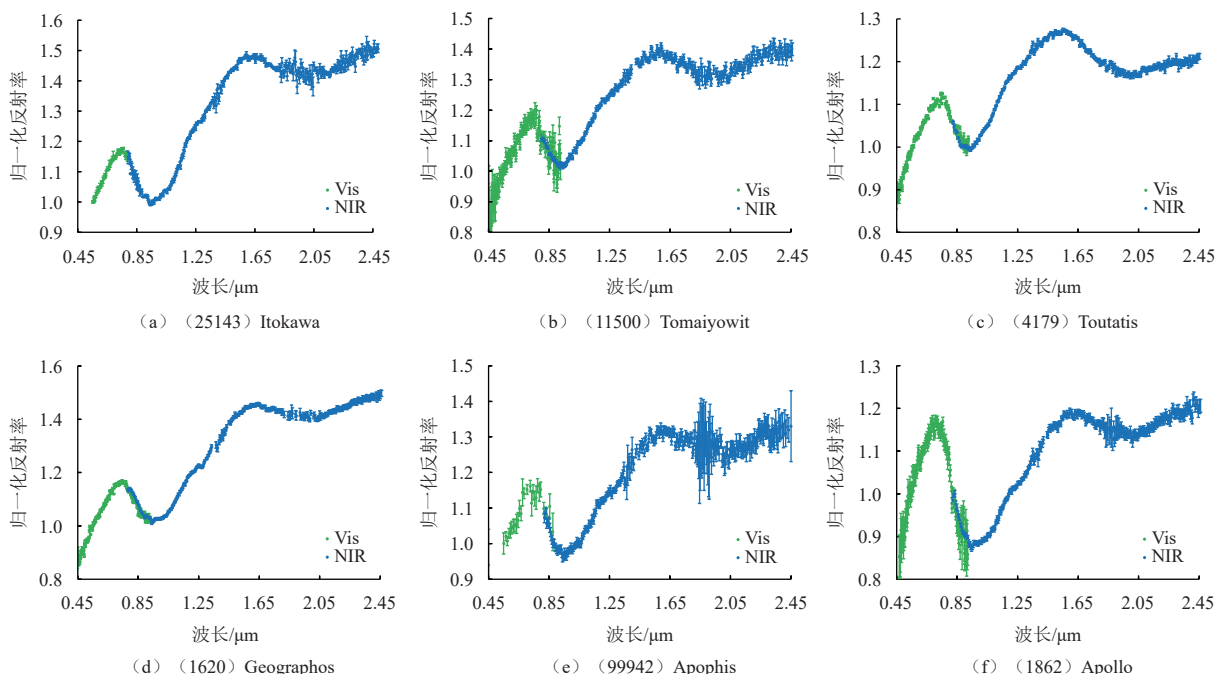
$$\ln[R(\lambda)] = F(\text{cont}) + \sum_{i=1}^N S_i \exp\left[-\frac{(\lambda^{-1} - \mu_i^{-1})^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (5)$$

其中: λ 为波长; $R(\lambda)$ 为波长 λ 的反射率; S_i 为高斯峰吸收强度; μ_i 为高斯峰吸收中心; σ_i 为高斯峰吸收宽度; N 为高斯峰数量; $F(\text{cont})$ 为连续统函数。

波长空间的二阶多项式连续统能最大程度地拟合光谱形状^[24]

$$F(\text{cont}) = \ln(a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2) \quad (6)$$

其中: λ 为波长; a_0 、 a_1 、 a_2 分别为平均反射率、整体斜率和函数曲率。



注: 所有光谱均带误差棒且归一化至0.55 μm 。数据来源: <http://www.smass.mit.edu/minus.html>。

图1 可见光-近红外光谱

Fig. 1 VIS-NIR spectra

BIC、BIIC与BAR间关系可大致确定矿物类型和含量。然而研究表明小行星BAR与BIIC受温度变化影响^[25]。本文采用如下公式来消除温度影响^[26]

$$\Delta\text{BAR} = 0.000\ 75 \times T(k) - 0.23 \quad (8)$$

$$\Delta\text{BII}(\mu\text{m}) = 0.06 - 0.000\ 2 \times T(k) \quad (9)$$

其中: ΔBII 和 ΔBAR 分别是BIIC和BAR的修正值, T 为小行星表面温度(基于近地小行星热物理模型(Near Earth Asteroids Thermal Model, NEATM)计算表面温度^[23])。计算得到的6颗PHAs的物理参数和光谱参数如表2所示。

拟合结果的精度使用对数空间下观测得到的反射光谱值 $\ln[R'(\lambda)]$ 和拟合光谱值 $\ln[R(\lambda)]$ 的残差 H 控制为

$$H = \sum_{\lambda=450}^{2450} \{\ln[R'(\lambda)] - \ln[R(\lambda)]\}^2 \quad (7)$$

2 结果与讨论

图1展示了(25143) Itokawa、(11500) Tomaiyowit、(4179) Toutatis、(1620) Geographos、(99942) Apophis和(1862) Apollo的光谱曲线, 所有光谱归一化至0.55 μm 。其中(25143) Itokawa、(11500) Tomaiyowit和(4179) Toutatis是S型, (1620) Geographos和(99942) Apophis是Sq型, (1862) Apollo是Q型。

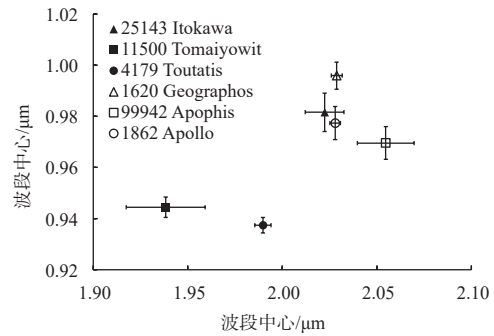
表2 6颗PHAs的物理参数和光谱参数

Table 2 Physical parameters and spectral band parameters of six PHAs

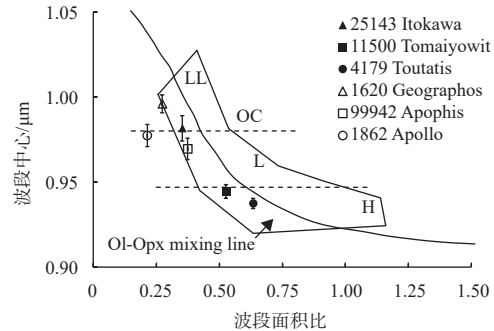
小行星	表面温度/K	波段 I 中心/ μm	波段 II 中心/ μm	BAR
(25143) Itokawa	279.19	0.9833 ± 0.0024	2.0224 ± 0.0103	0.3530 ± 0.0002
(11500) Tomaiyowit	364.99	0.9517 ± 0.0027	1.9383 ± 0.0208	0.5261 ± 0.0039
(4179) Toutatis	215.46	0.9450 ± 0.0021	1.9898 ± 0.0043	0.6339 ± 0.0003
(1620) Geographos	287.79	0.9850 ± 0.0023	2.0287 ± 0.0029	0.2733 ± 0.0001
(99942) Apophis	341.34	0.9800 ± 0.0053	2.0547 ± 0.0150	0.3741 ± 0.0004
(1862) Apollo	325.98	0.9717 ± 0.0021	2.0280 ± 0.0028	0.2140 ± 0.0001

图2(a)展示了这6颗PHAs的BIC和BIIC。本文所研究PHAs的B II C都超过1.93 μm , 反映矿物组成应含高钙辉石。图2(b)展示6颗小行星BIC和BAR, 除(1862) Apollo略微偏移外, 其余小行星均位于OC (Ordinary Chondrite) 多边形区域, 即它们均具有与OCs类似的矿物组成——富橄榄石与辉石。(25143) Itokawa、(99942) Apophis和(1862) Apollo落在LL与L球粒陨石分界线附近, (11500) Tomaiyowit和(4179) Toutatis落在L与H球粒陨石分界线附近。

基于上述波段中心和波段面积比分析, 6颗PHAs均含有橄榄石、低钙辉石和高钙辉石。采用3~9个高斯峰对橄榄石—低钙辉石—高钙辉石构型进行MGM反演, 结果表明9高斯峰残差最低且具备物理意义^[24]。小于600 nm的强吸收带Band 1是由近紫外电荷转移造成的, 部分小行星光谱在650 nm附近的弱吸收带Band 2归因于少量元素(如Cr、Ni)的跃迁^[19, 29]。上述两个高斯峰有助于稳定可见光区域拟合光谱的整体形状, 但不作为吸收特征来判别矿物。850nm、1 050nm、1 250 nm的吸收带Band 3、Band 6、Band 7是橄榄石在1 μm 附近由于Fe²⁺电荷转移引起的^[29]。Band 4、Band 5代表低钙辉石与高钙辉石在1 μm 附近的吸收, Band 8、Band 9代表低钙辉石与高钙辉石在2 μm 附近的吸收^[19]。连续统最初设置为与光谱相接的曲线, 在实际反演时允许其自由移动, 即无需保证连续统结果与光谱相



(a) B I C与B II C关系图^[18]



(b) B I C与BAR关系图^[24]

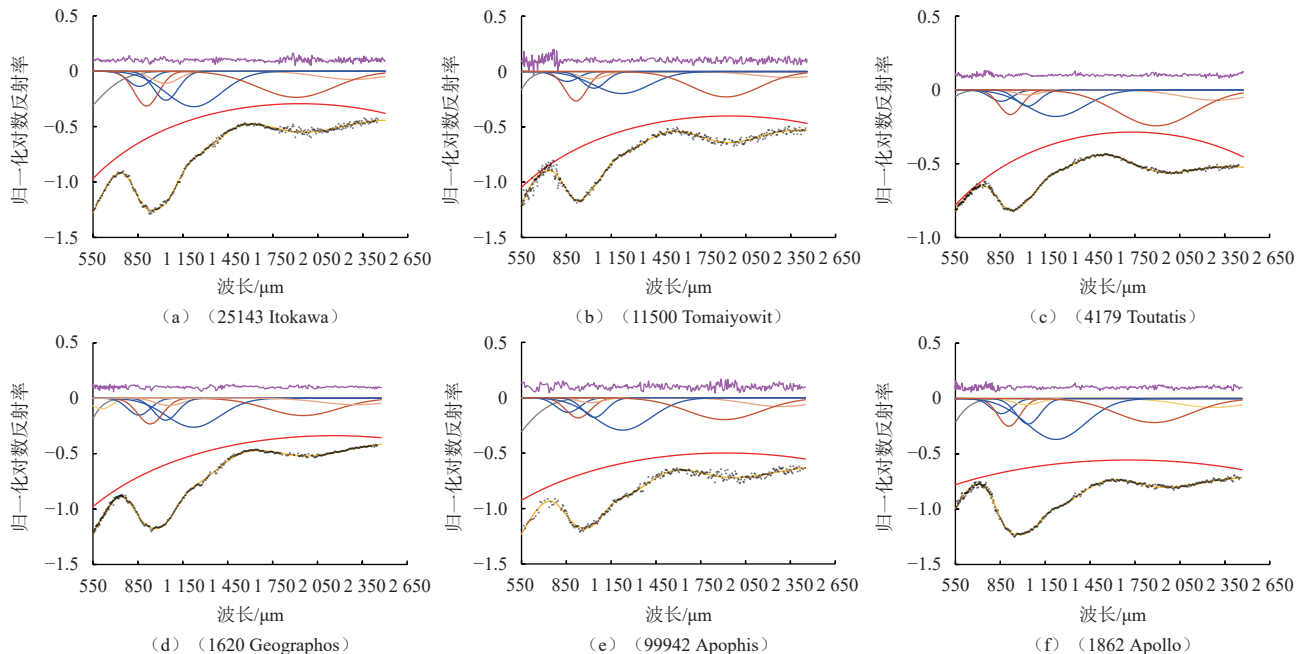
注: 粗实线表示橄榄石—辉石矿物混合线, 闭合多边形对应OL (Olivine) 区域^[27], 虚线表示LL、L、H球粒陨石区域划分线^[28]。

图2 光谱参数关系图

Fig. 2 Plot of spectral parameters

接。MGM的拟合结果见图3, 拟合的具体参数见表3。

6颗PHAs的镁橄榄石指数(Fo#)、辉石矿物中低



注: 黑点代表小行星对数反射率; 红线表示连续统; 灰色、金黄色、蓝色、深棕色和浅棕色曲线分别表示近紫外电荷转移、少量元素跃迁、橄榄石、低钙辉石和高钙辉石吸收; 橙色曲线是高斯峰叠加连续统的拟合结果; 紫色折线表示残差。为清楚起见, 残差在纵坐标上偏移+0.1, 部分连续统和对数反射率在纵坐标上偏移-0.3。

图3 (25143) Itokawa、(11500) Tomaiyowit、(4179) Toutatis、(1620) Geographos、(99942) Apophis和(1862) Apollo的MGM拟合结果

Fig. 3 MGM fitting results of (25143) Itokawa, (11500) Tomaiyowit, (4179) Toutatis, (1620) Geographos, (99942) Apophis and (1862) Apollo

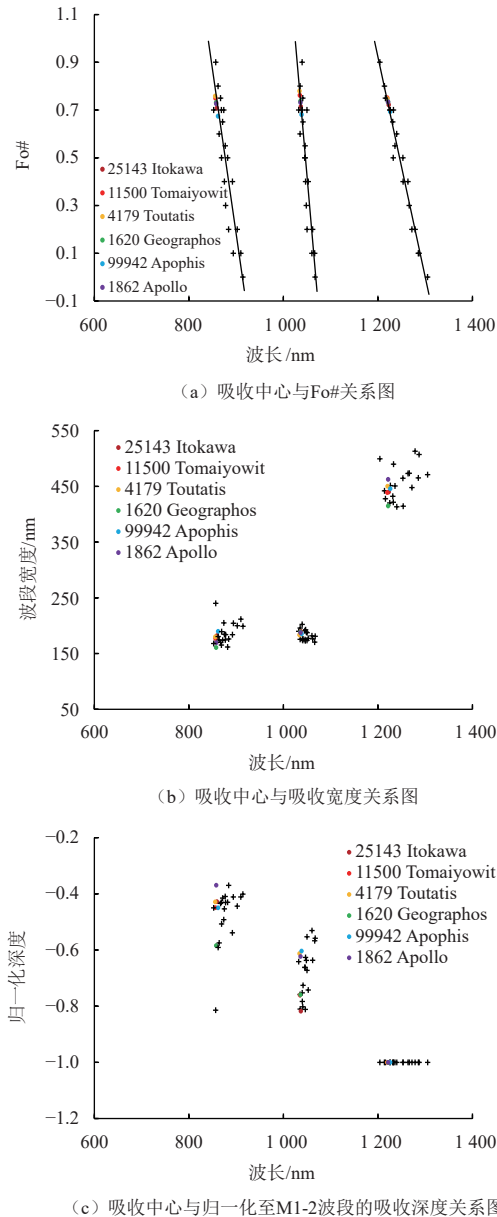
表 3 6颗PHAs光谱MGM拟合参数结果
Table 3 Physical parameters and spectral parameters for six PHAs

小行星	Center/nm	FWHM/nm	Strength (log reflectance)	Str.LCP/Str.HCP	HCP/ (HCP+LCP)	Fo#	Continuum/Error in fit
(25143) Itokawa							
Band 1	351.56	482.34	-0.49	2.86	0.335	0.708	a_0 : 4.20×10^{-2} a_1 : 1.05×10^{-3} a_2 : -2.73×10^{-7} Error: 1.50%
Band 3	859.28	177.24	-0.14				
Band 4	907.36	191.89	-0.31				
Band 5	1030.91	216.14	-0.11				
Band 6	1036.89	191.84	-0.26	3.15	0.320	0.714	
Band 7	1222.83	434.55	-0.32				
Band 8	1906.31	600.42	-0.24				
Band 9	2281.99	536.28	-0.07				
(11500) Tomaiyouwit							
Band 1	266.14	318.78	-1.47	3.97	0.255	0.750	a_0 : 6.86×10^{-2} a_1 : 8.58×10^{-4} a_2 : -2.21×10^{-7} Error: 4.70%
Band 3	856.26	177.05	-0.09				
Band 4	914.29	174.51	-0.27				
Band 5	1022.52	203.69	-0.07				
Band 6	1034.79	184.15	-0.15	4.26	0.250	0.762	
Band 7	1219.66	438.95	-0.20				
Band 8	1918.02	530.16	-0.23				
Band 9	2344.92	549.97	-0.05				
(4179) Toutatis							
Band 1	347.87	271.57	-0.20	4.96	0.215	0.758	a_0 : 1.65×10^{-1} a_1 : 9.82×10^{-4} a_2 : -2.84×10^{-7} Error: 1.00%
Band 3	855.65	176.71	-0.08				
Band 4	917.71	180.96	-0.17				
Band 5	1035.52	201.08	-0.03				
Band 6	1034.02	183.08	-0.11	3.48	0.295	0.779	
Band 7	1220.11	456.12	-0.18				
Band 8	1892.99	610.51	-0.24				
Band 9	2292.82	538.59	-0.07				
(1620) Geographos							
Band 1	308.63	306.11	-1.04	3.57	0.280	0.731	a_0 : 1.43×10^{-1} a_1 : 7.60×10^{-4} a_2 : -1.76×10^{-7} Error: 2.29%
Band 2	608.15	161.75	-0.10				
Band 3	857.57	178.66	-0.15				
Band 4	932.68	195.80	-0.23				
Band 5	1059.24	209.68	-0.07	2.73	0.370	0.737	
Band 6	1035.87	187.47	-0.20				
Band 7	1221.47	423.58	-0.26				
Band 8	1953.35	557.58	-0.16				
Band 9	2305.10	545.43	-0.06				
(99942) Apophis							
Band 1	328.84	476.59	-0.55	4.17	0.245	0.674	a_0 : 3.18×10^{-1} a_1 : 7.13×10^{-4} a_2 : -1.86×10^{-7} Error: 2.19%
Band 3	861.70	187.57	-0.13				
Band 4	929.90	194.61	-0.18				
Band 5	1011.81	200.64	-0.04				
Band 6	1038.33	185.95	-0.18	2.47	0.395	0.681	
Band 7	1225.90	452.91	-0.29				
Band 8	1908.28	583.46	-0.20				
Band 9	2287.40	545.82	-0.08				
(1862) Apollo							
Band 1	291.81	367.91	-0.85	4.49	0.230	0.727	a_0 : 5.35×10^{-1} a_1 : 4.80×10^{-4} a_2 : -1.40×10^{-7} Error: 1.65%
Band 2	857.93	169.64	-0.14				
Band 3	907.68	172.92	-0.25				
Band 4	1026.44	205.93	-0.06				
Band 5	1036.11	187.59	-0.23	2.71	0.365	0.732	
Band 6	1221.56	462.68	-0.37				
Band 7	1875.84	588.66	-0.22				
Band 8	2276.84	544.49	-0.08				
Band 9	291.81	367.91	-0.85				

钙和高钙辉石占比见表3。随铁含量的增加, 橄榄石反射光谱3个吸收中心线性地向长波方向移动^[21-22,29]。吸收

中心的连续变化由稍大的 Fe^{2+} (离子半径为 0.77 \AA) 取代 Mg^{2+} (离子半径为 0.72 \AA) 引起, 该变化反映橄榄

石中镁橄榄石含量。如图4(a)所示,6颗PHAs的镁橄榄石含量相似, $Fo\# = 0.68 \sim 0.76$ (表2)。本文得到的反演得到的橄榄石吸收宽度和吸收强度比均在纯橄榄石吸收范围内(图4(b)和4(c))^[29]。根据低钙辉石、高钙辉石高斯峰深度之比与高钙辉石占比关系^[9],如图5所示,6颗小行星高钙辉石占比悬殊较大,其中 $HCP/(LCP + HCP) = 0.17 \sim 0.38$ (表2)。



注: 黑十字(+)代表纯橄榄石样品MGM反演结果, 黑线代表镁橄榄石含量趋势线^[26]。

图4 PHAs橄榄石高斯峰参数
Fig. 4 Gaussian peak parameters of PHAs olivine

如图3所示,6颗PHAs均含橄榄石、低钙辉石和高钙辉石。由橄榄石高斯峰吸收中心(图4(a))与低钙高钙辉石高斯峰吸收深度之比(图5)可见,小行星(25143) Itokawa、(1620) Geographos、(99942)

Apophis与(1862) Apollo的 $Fo\# = 0.68 \sim 0.74$ 。高钙辉石占比为0.230~0.395,表明它们的陨石类似物为LL球粒陨石。(11500) Tomaiyowit和(4179) Toutatis具有较高的镁橄榄石指数($Fo\# = 0.74 \sim 0.76$)。与上述4颗PHAs相比显示出较低的高钙辉石占比, $HCP/(LCP + HCP) = 0.215 \sim 0.295$,表明这两颗小行星与L球粒陨石相似。本文研究结果与Tsuchiyama等^[30]对Itokawa返回样品测量的矿物成分一致($Fo\# = 0.714$),也与Binzel等^[5]使用Shkuratov模型对Apophis小行星成分($Fo = 65 \sim 75$)推断一致。

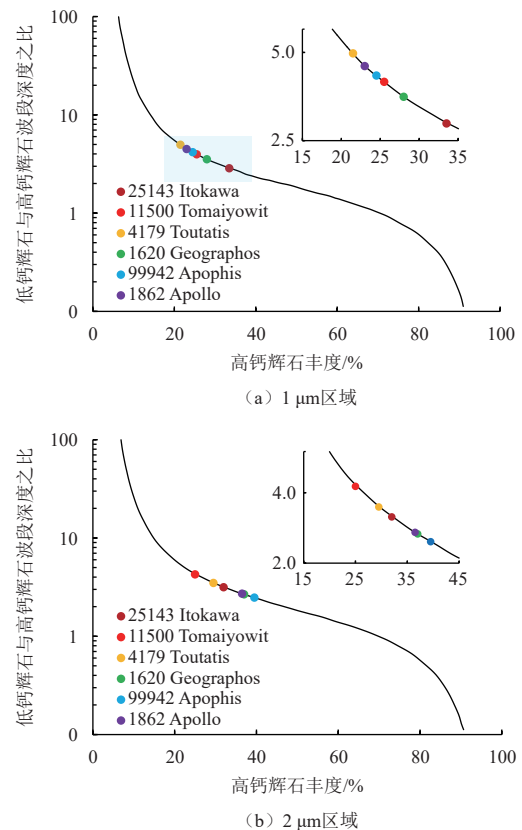


图5 低钙、高钙辉石吸收深度比与高钙辉石丰度间的对数关系^[12]
Fig. 5 Logarithmic relationships between component band strength ratios (CBSR) for primary LCP and HCP absorption bands and modal abundance of HCP^[12]

3 结论

了解PHAs的矿物组成与陨石类似物能为构建小行星防御命运共同体提供基础支撑。本文结合经验模型与MGM反演6颗PHAs矿物组成。研究结果如下。

1) 6颗PHAs类型分别是S型、Sq型与Q型,它们的矿物主要由橄榄石、低钙辉石和高钙辉石组成。镁橄榄石指数 $Fo\# = 0.68 \sim 0.76$,高钙辉石占比为0.215~0.395。

2) 小行星(25143) Itokawa、(1620) Geographos、(99942) Apophis和(1862) Apollo表面矿物组成与LL球粒陨石相似,(11500) Tomaiyowit和(4179) Toutatis表面矿物组成与L球粒陨石类似。

参 考 文 献

- [1] PERNA D, DOTTO E, IEVA S, et al. Grasping the nature of potentially hazardous asteroids[J]. *The Astronomical Journal*, 2015, 151(1): 11.
- [2] 龚自正, 李明, 陈川, 等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术[J]. *科学通报*, 2020, 65(5): 346-372.
- GONG Z Z, LI M, CHEN C, et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(5): 346-372.
- [3] MILLER S D, STRAKA III W C, BACHMEIER A S, et al. Earth-viewing satellite perspectives on the Chelyabinsk meteor event[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(45): 18092-18097.
- [4] 吴伟仁, 龚自正, 唐玉华, 等. 近地小行星撞击风险应对战略研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(2): 140-151.
- WU W R, GONG Z Z, TANG Y H, et al. Response to risk of near-earth asteroid impact[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(2): 140-151.
- [5] BINZEL R P, RIVKIN A S, THOMAS C A, et al. Spectral properties and composition of potentially hazardous Asteroid (99942) Apophis[J]. *Icarus*, 2009, 200(2): 480-485.
- [6] REDDY V, SANCHEZ J A, GAFFEY M J, et al. Composition of near-Earth asteroid (4179) Toutatis[J]. *Icarus*, 2012, 221(2): 1177-1179.
- [7] WANG P Y, CLOUTIS E, ZHANG X P, et al. Quantitative mineral analysis of (99942) Apophis using reflectance spectroscopy[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2023, 58(10): 1399-1405.
- [8] XU S, BINZEL R P, BURBINE T H, et al. Small main-belt asteroid spectroscopic survey: initial results[J]. *Icarus*, 1995, 115(1): 1-35.
- [9] RAYNER J T, TOOMEY D W, ONAKA P M, et al. SpeX: a medium-resolution 0.8-5.5 micron spectrograph and imager for the NASA infrared telescope facility[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2003, 115(805): 362.
- [10] LIU J J, LIU B, REN X, et al. Evidence of water on the lunar surface from Chang'E-5 in-situ spectra and returned samples[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3119.
- [11] CLOUTIS E A, GAFFEY M J, JACKOWSKI T L, et al. Calibrations of phase abundance, composition, and particle size distribution for olivine-orthopyroxene mixtures from reflectance spectra[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B11): 11641-11653.
- [12] GAFFEY M J, CLOUTIS E A, KELLEY M S, et al. Mineralogy of asteroids[M]. Binzel Tucson: The University of Arizona Press, 2002: 183-204.
- [13] DUNN T L, MCCOY T J, SUNSHINE J M, et al. A coordinated spectral, mineralogical, and compositional study of ordinary chondrites[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 789-797.
- [14] POPESCU M, BIRLAN M, NEDELCU D A. Modeling of asteroid spectra-M4AST[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 544: A130.
- [15] HARRIS A W. A thermal model for near-Earth asteroids[J]. *Icarus*, 1998, 131(2): 291-301.
- [16] MAINZER A, GRAV T, BAUER J, et al. NEOWISE observations of near-Earth objects: preliminary results[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 743(2): 156.
- [17] SUNSHINE J M, PIETERS C M, PRATT S F. Deconvolution of mineral absorption bands: an improved approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990, 95(B5): 6955-6966.
- [18] SUNSHINE J M, PIETERS C M, PRATT S F, et al. Absorption band modeling in reflectance spectra: availability of the modified Gaussian model[C]//Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1999: 1306.
- [19] SUNSHINE J M, PIETERS C M. Estimating modal abundances from the spectra of natural and laboratory pyroxene mixtures using the modified Gaussian model[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, 98(E5): 9075-9087.
- [20] SUNSHINE J M, MCFADDEN L A, PIETERS C M. Reflectance spectra of the Elephant Moraine A79001 meteorite: implications for remote sensing of planetary bodies[J]. *Icarus*, 1993, 105(1): 79-91.
- [21] SUNSHINE J M, PIETERS C M. Determining the composition of olivine from reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1998, 103(E6): 13675-13688.
- [22] SUNSHINE J M, BUS S J, MCCOY T J, et al. High - calcium pyroxene as an indicator of igneous differentiation in asteroids and meteorites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2004, 39(8): 1343-1357.
- [23] SUNSHINE J M, BUS S J, CORRIGAN C M, et al. Olivine - dominated asteroids and meteorites: distinguishing nebular and igneous histories[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2007, 42(2): 155-170.
- [24] CLÉNET H, PINET P, DAYDOU Y, et al. A new systematic approach using the modified Gaussian model: insight for the characterization of chemical composition of olivines, pyroxenes and olivine-pyroxene mixtures[J]. *Icarus*, 2011, 213(1): 404-422.
- [25] MICHEL P, DEMEO F E, BOTTKÉ W F. Asteroids IV[M]. Tucson: University of Arizona Press, 2015.
- [26] SANCHEZ J A, REDDY V, NATHUES A, et al. Phase reddening on near-Earth asteroids: implications for mineralogical analysis, space weathering and taxonomic classification[J]. *Icarus*, 2012, 220(1): 36-50.
- [27] GAFFEY M J, BELL J F, BROWN R H, et al. Mineralogical variations within the S-type asteroid class[J]. *Icarus*, 1993, 106(2): 573-602.
- [28] DUNN T L, MCCOY T J, SUNSHINE J M, et al. A coordinated spectral, mineralogical, and compositional study of ordinary chondrites[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 789-797.
- [29] PINET P C, DAYDOU Y H, CHEVREL S D. Olivine composition and reflectance spectroscopy relationship revisited from advanced MGM deconvolution based on synthetic and natural samples[J]. *Icarus*, 2022, 373: 114765.
- [30] TSUCHIYAMA A. Asteroid Itokawa a source of ordinary chondrites

and a laboratory for surface processes[J]. *Elements*, 2014, 10(1): 45-50.

作者简介:

黄海涛(2000-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 小行星遥感与深空探测。

通信地址: 江苏省南京市栖霞区元化路10号中国科学院紫金山天文台(210023)

电话: 15716066122

E-mail: ht.huang.pmo@qq.com

吴昀昭(1977-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 行星遥感与深空探测。**本文通信作者。**

通信地址: 江苏省南京市栖霞区元化路10号中国科学院紫金山天文台(210023)

电话: 13814014001

E-mail: wu@pmo.ac.cn

Quantitative Inversion of Minerals on Potentially Hazardous Asteroids

HUANG Haitao^{1,2}, WU Yunzhao^{1,3}, WANG Li^{4,5}, JIAO Hengyue^{1,2}, LI Yanzhao³, LEI Kaiyu^{4,5}

(1. Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China;

2. School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Space Science Institute, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China;

4. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094190, China;

5. Optoelectronic Measurement and Intelligent Perception Zhongguancun Open Laboratory, Beijing 100190, China)

Abstract: Potentially hazardous asteroids (PHAs) pose a significant threat to Earth, with the potential to cause biological extinction and even human destruction. To cope with the impact risk of potentially hazardous asteroids (PHAs) and create a defense plan, the mineral composition of PHAs was studied using Modified Gaussian Model (MGM), and the relationship between meteorite analogues was established. The model obtained the individual absorption characteristics of minerals by deconvolution of mixture spectra. Applying MGM to six PHAs, the results show that the six PHAs are S-type, Sq-type and Q-type, respectively. The minerals are mainly composed of olivine, low-calcium pyroxene, and high-calcium pyroxene. The forsterite index (Fo#) is 0.68-0.76, and the proportion of high-calcium pyroxene is 0.17-0.38. The meteorite analogues corresponding to asteroids Itokawa, Geographos, Apophis and Apollo are LL chondrites, and the meteorite analogues of asteroids Tomaiyowit and Touratis are similar to L chondrites.

Keywords: potentially hazardous asteroids; spectrum; mineral; ordinary chondrite meteorites

Highlights:

- Six potentially hazardous asteroids [(25143) Itokawa, (1620) Geographos, (99942) Apophis and (1862) Apollo are LL chondrites, and asteroids (11500) Tomaiyowit and (4179) Toutatis] were selected as research targets, and their mineral composition was obtained using the Modified Gaussian Model.
- Based on the retrieved mineral composition, it is concluded that the meteorite analogues of (25143) Itokawa, (1620) Geographos, (99942) Apollo and (1862) Apollo are LL chondrites, and the meteorite analogues of (11500) Tomaiyowit and (4179) Toutatis are L chondrites.
- This research makes up for the shortage of potentially hazardous asteroids mineral data and provides basic support for near Earth asteroids defense including potentially hazardous asteroids.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]