arXiv:2611.30459v1 [astro-ph.EP] 23 Nov 2026

基于火星观测对赫拉/HyperScout-H与火星勘测轨道飞行器/CRISM及火星快车/OMEGA进行交叉定标

A. Farina[a]、M. Popescu[b、c]、M. Lazzarin[a]、J. deLeón[d、e]、G. Prodan[d、e]、B. A. Dumitru[b]、F. La Forgia[a]、G. Poggiali[f]、M. Küppers[g]、G. Kovács[h]、B. V. Nagy[h]、B. Grieger[i]、O. Barnouin[j]、E. Tatsumi[d、e]、Ö. Karatekin[k]、P. Michel[l]

[a]意大利国家天体物理研究所阿切特里天体物理台、帕多瓦大学，意大利帕多瓦市天文台巷*3*号，邮编*35122*[b]空间科学研究所——*INFLPR*分部，罗马尼亚伊尔福夫县马古雷莱市*Atomişti lor*街*409*号，邮编*077125*[c]克拉约瓦大学，罗马尼亚克拉约瓦市亚历山德鲁·约安·库扎街*13*号，邮编*200585*[d]加那利群岛天体物理研究所，西班牙特内里费岛拉拉古纳市银河路，邮编*E-38205*[e]天体物理系、拉拉古纳大学，西班牙特内里费岛拉拉古纳市天体物理学家弗朗西斯科·桑切斯街，邮编*E-38205*[f]意大利国家天体物理研究所阿切特里天体物理台，意大利佛罗伦萨市恩里科·费米大道*5*号，邮编*50125*[g]欧洲航天局、欧洲空间天文中心（*ESAC*），西班牙马德里[h]机电一体化、光学与工程信息学系、布达佩斯科技与经济大学，匈牙利布达佩斯[i]*Aurora Technology B.V.*（为欧洲航天局提供服务），欧洲空间天文中心，西班牙马德里[j]空间探索部门、约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室，美国马里兰州劳雷尔[k]比利时皇家空间航空学研究所，比利时布鲁塞尔环形大道*3*号，邮编*1180*[l]蔚蓝海岸大学、蔚蓝海岸天文台、法国国家科学研究中心、拉格朗日实验室，法国尼斯

摘要

2025年3月12日，赫拉号（Hera）是欧洲航天局执行行星防御任务的探测器，在前往小行星系统（65803）迪迪莫斯—迪莫弗斯的途中进行了火星飞掠。在此次事件中，搭载于该航天器上的高光谱成像仪HyperScout-H（HS-H）获取了火星南半球上空的五幅高空间分辨率图像。这些观测为HS-H与两台成熟的火星轨道仪器开展系统性交叉定标提供了机会：火星勘测轨道飞行器上的火星紧凑型勘测成像光谱仪（CRISM） [19], 以及Observatoire

pour la Minéralogie, l’Eau, les Glaces et l’Activité（OMEGA）搭载于火星快车号 [2]。本研究通过将HS-H与CRISM和OMEGA数据进行比较，评估了HS-H在即将到来的小行星观测阶段的性能、可靠性和就绪程度。我们从三幅HS-H图像中选取了21个涵盖多种地形类型的表面区域，这些图像中的火星表面充满整个视场。我们对这些图像进行了校正、定标和配准，使每个像素均与纬度和经度相关联。对于波段3–25（0.688–0.952 μm），通道间相对校正因子接近1；与OMEGA和CRISM相比，其标准差分别为0.52%和0.62%，表明光谱形状具有良好的一致性。波段1和2分别显示出4.7%和3.6%的系统性偏差。绝对通量校正因子显示，相对于OMEGA存在8%的偏移，而相对于CRISM的偏移约为0.7%；图像间平均标准差低于2%。这些结果证实了HS-H的辐射稳定性，并为未来对双星小行星迪迪莫斯—迪莫弗斯的观测建立了定标框架。

关键词：仪器、小行星、分光光度测量、近地天体、火星

---

1. 引言

赫拉任务是在欧洲航天局（ESA）太空安全计划框架下制定的，是欧洲对小行星撞击与偏转评估（AIDA）合作项目的贡献。其目标是双小行星系统迪迪莫斯—迪莫弗斯；该系统的次级天体 Dimorphos 曾是美国国家航空航天局（NASA）双小行星重定向测试（DART）的撞击目标。该测试首次展示了利用动能撞击器实现小行星偏转的技术[25, 3]。基于这项实验，赫拉将详细表征 DART撞击的结果，并确定该系统两个组成天体的物理、表面和内部特性，为验证行星防御撞击模型提供所需的地面实测数据 [14, 15]。

为实现这些目标，赫拉采用了一种用于深空探测的新型架构，将一艘主航天器与两颗立方体卫星尤文塔斯和米拉尼结合起来 [15]。主航天器搭载了小行星成像相机（AFC）、高光谱成像仪（HyperScout-H，以下简称 HS-H）、热红外成像仪（TIRI）和行星高度计（PALT）。尤文塔斯搭载了低频雷达 JuRa，致力于首次直接探测一颗小行星的内部，

而米拉尼搭载了近红外成像光谱仪 ASPECT 和用于尘埃表征的 VISTA热重仪。赫拉于2024年10月7日14:52（世界时）搭乘SpaceX猎鹰9号火箭从卡纳维拉尔角发射升空 [16]。发射几天后，它获取了地月系统的图像，确认其搭载仪器运行正常；2025年3月12日，它成功飞掠火星，并观测了火星卫星戴莫斯 [16]。赫拉将于2026年11月初抵达Didymos–Dimorphos系统，届时将开始近距离探测阶段，并对这对双星小行星开展至少六个月的观测。

迪迪莫斯是属于阿波罗动力学族的近地双小行星。主星直径为 761 ± 26 米，次星名为Dimorphos，直径为 151 ± 5 米 [4]。从光谱学角度来看，该系统被归类为S型小行星 [5], ，与普通球粒陨石有关 [6]。DART撞击后，其表面成分仍符合S型分类，光谱斜率略有变化，这可能与喷出物云的演化或沉积在迪迪莫斯表面的物质有关 [22, 12]。撞击使Dimorphos的轨道周期缩短了约33分钟 [27, 21]。

HS-H仪器是搭载于赫拉航天器上的高光谱成像仪，可在0.65–0.95μ米波长范围内同步获取空间和光谱信息。其主要科学目标是表征迪迪莫斯和Dimorphos的表面成分、研究空间风化效应，并搜寻这些天体上的外源物质 [23]。此外，HS-H将揭示DART撞击挖掘出的新鲜裸露次表层物质的光谱特性，并生成用于分类学分类、光谱斜率和波段参数的光谱图，以更准确地约束该系统的物理性质 [15, 23]。在2025年3月火星飞掠期间，HS-H观测了火星及其两颗卫星火卫一和火卫二，为在2026年11月抵达Didymos系统之前评估仪器在飞行中的辐射定标性能提供了宝贵机会。

为验证 HS-H 的观测结果，我们利用了两台成熟的高光谱仪器所获取的数据。这两台仪器已从轨道上观测火星二十余年，分别是矿物学、

水、冰与活动 观测站（OMEGA），搭载于欧洲航天局的火星快车号航天器上 [2]；以及火星紧凑型勘测成像光谱仪 （CRISM），搭载于美国国家航空航天局的火星勘测轨道飞行器上 [19]。这两台仪器的波长范围均与 HS-H 重叠：OMEGA 覆盖 0.35–5.2μm，CRISM 覆盖 0.362–3.92 μm，因此是 HS-H 波长范围内理想的光谱参照。它们长期的运行历史和丰富的校准历史，提供了稳健且特性明确的数据集，可用于对 HS-H 数据进行有意义的比较。

OMEGA 是搭载于火星快车号上的高光谱成像光谱仪，自 2003 [2] 年 12 月起在火星轨道运行。它覆盖 0.35 至 5.2 μ µm 的可见光和近红外光谱范围，包含 352 个连续的光谱采样点；根据轨道高度不同，其空间分辨率为每像素 300 米至 4.8 千米。此处的“通道”专指 OMEGA 的三个光谱仪，即 VNIR、短波红外-C 和短波红外-L。VNIR 通道包含 96 个光谱采样点，覆盖 HS-H 的光谱范围，因此提供了与本次比较相关的数据集。波长超过 0.93 µm 的光谱采样点受到高阶光栅级次的污染，不包含在数据产品中，因此与 HS-H 的重叠范围在 0.93 至 0.95 µm 之间存在一个小间隙。其主要科学目标是绘制火星表面的全球矿物分布图，尤其着重于探测和表征含水矿物、冰及火山沉积物 [1]。

CRISM是搭载于火星勘测轨道飞行器（MRO）上的高光谱成像光谱仪，自 2006 [19]以来一直在火星轨道上运行。它的工作波段覆盖可见光与近红外范围，波长为0.362至3.92 μm，包含544个光谱通道，每个通道的采样间隔为6.55 nm。在定向观测模式下，CRISM的空间分辨率可达18或36 m像素$^{-1}$，显著高于OMEGA，因此能够表征小尺度矿物沉积，并识别在OMEGA的空间尺度下无法分辨的水蚀变产物。在巡测模式下，其空间分辨率为100或200 m像素$^{-1}$，每个像素包含72个光谱采样点 [19, 29]。本研究使用的CRISM数据是第3.1节所述的可见光与近红外高光谱制图产品，保留了VNIR探测器的完整光谱分辨率。

空间仪器之间的交叉定标是评估不同任务科学测量可靠性和重复性的必要步骤。

独立仪器在绝对辐射定标方面可能存在系统偏移。这些偏移可能源于地面定标程序、所采用的太阳辐照度模型以及光度校正处理链的差异。如果不考虑这些偏移，就无法直接比较不同仪器获取的光谱，进而可能导致对表面光谱特性的错误解读。因此，对于 HS-H 而言，交叉定标是验证仪器在轨性能的必要手段，同时也能将 HS-H 数据与此前火星轨道器获取的光谱数据集进行比较，从而为未来对 Didymos-Dimorphos系统的观测分析提供一致的参考。除了仪器本身，在巡航阶段开展的科学观测还可在真实运行条件下，对整个处理链进行早期验证：从仪器获取的原始数据，到航天器遥测数据、任务地面段、1A级数据的提取及其向辐射量的转换，再到根据导航数据确定观测条件，即距离、光度角以及目标上的投影瞬时视场。像火星这样范围广且特性明确的目标尤其适合进行这项验证；对于巡航期间观测到的无法分辨的天体，则无法开展此类验证。

本文对火星 21 个表面区域的 HS-H 仪器与 OMEGA 和 CRISM 进行了全面交叉定标，为 HS-H 的全部 25 个光谱波段导出了波长相关校正因子，涵盖归一化通量和绝对通量。本文结构如下：第 2 节介绍 HS-H 仪器和所用数据集；第 3 节介绍 OMEGA 和 CRISM 数据集、光谱提取流程以及光谱预处理；第 4 节展示导出的校正因子；第 5 节讨论结果；第 6 节总结主要结论。

2. 数据观测

在本研究中，我们使用了三台高光谱仪器的观测数据，这些仪器可在上述波长范围内提供高空间分辨率火星观测。主要数据集包括赫拉航天器飞掠期间于2025年3月12日获取的三幅火星HS-H图像，从中提取了47条光谱

，覆盖21个表面区域（见图A.11）。我们将这些光谱与从OMEGA/Mars Express获取的47条光谱及从CRISM/MRO获取的47条光谱进行了比较；这些光谱均经过筛选，与相同的表面区域相匹配。以下小节将详细介绍这些仪器及其各自的数据集。

2.1. HyperScout-H

HS-H仪器是由 Cosine Remote Sensing BV 开发的微型快照式高光谱成像仪，基于最初为地球观测设计的 HyperScout 2 平台构建 [8, 9]。该仪器质量为 5.145 kg，体积为 $238 \times 190 \times 277$ mm^3。望远镜采用三反射镜消像散结构，孔径直径为 10.3125 mm，焦距为 41.25 mm，可提供约 15.$5^\circ \times 8.3^\circ$ 的宽视场（近轴近似下），考虑光学畸变时为 15.$9^\circ \times 9.9^\circ$（Popescu 等人 [23]）。

探测器为 AMS CMV2000 硅互补金属氧化物半导体（CMOS）阵列，表面镀有像素化法布里-珀罗干涉滤光片，像素间距为 5.5 μm，总规格为 2048×1088 个子像素。该探测器通过宏像素架构实现光谱分离，每个宏像素由一个 5×5子像素矩阵组成，每个子像素上覆盖着不同的窄带滤光片。由此可获得总计 25 个光谱波段，覆盖 0.65–0.95 μm 波长范围；其中位中心波长范围为 0.661 至 0.952 μm，波段半峰全宽介于 0.008 和 0.022 μm 之间。以宏像素计的有效探测器规格为 409×217。模数转换器（ADC）的分辨率为 12 位。在距离 1 km 处，空间采样为每个子像素 13.2 cm、每个宏像素 66 cm[23]。滤光片轮廓呈现带外波纹，平均带内带外比为 0.7；将 HS-H 数据与其他仪器的光谱进行比较时，必须考虑这一点。

每个通道的光谱响应由其光学传递函数描述，其中包括法布里–珀罗干涉滤光片的透射率曲线和 CMOS探测器的量子效率（公式 1）。对于给定的光谱 $S(\lambda)$，通道 i 中记录的信号计算如下：

$$S^i_{\mathrm{HS-H}} = \frac{\int F^i(\lambda) S(\lambda) \lambda \, d\lambda}{\int F^i(\lambda) \lambda d\lambda} \tag{1}$$

其中，F(λ) 是通道 i 的传递函数。根据在欧洲空间研究与技术中心（ESTEC）实验室开展的飞行前辐射定标所得到的各通道灵敏度因子，已在 Popescu 等人 [23] 的研究中报告。在轨灵敏度因子，即实际应用于本文所分析数据的灵敏度因子，采用的是 Prodan 等人 [24] 的结果。

2.2. 飞行前与飞行中定标

HS-H 的飞行前定标由 Cosine Remote Sensing BV 和欧洲航天局/ESTEC 分别通过两次独立的定标活动完成，结果显示在 $\pm 2\%$ [23] 以内一致。定标流程包括暗电流表征、平场校正和坏像元映射——仅识别出 12 个独立热像元和 3 行故障探测器行，并在定标图像中以 NaN值 替代。辐射定标使用直径 0.5 m 的积分球进行，得出了每个通道的灵敏度因子。这些因子的相对不确定度为每通道 0.06%，通过计算同一通道内像元之间的离散度得到；该数值不包括灯输出的 0.25% 峰峰值稳定性，且其量化的是实验室测量的重复性，而非绝对辐射尺度的准确度 [23]。利用棋盘格靶标对几何畸变进行了量化，并通过二维三阶多项式校正函数 $f_x(x_d,\ y_d)$ 和$f_y(x_d,\ y_d)$ 进行建模，使得：

$$f_x(x_d, y_d) = \Delta x, \quad f_y(x_d, y_d) = \Delta y \tag{2}$$

其中，$\Delta x = x_u - x_d$ 和 $\Delta y = y_u - y_d$ 分别表示沿各轴的像元位移校正，$(x_d,\ y_d)$、$(x_u,\ y_u)$分别为畸变和未畸变坐标 [24]。将此飞行前模型应用于在轨星场观测后，X轴和Y轴上的均方根残差分别为14.9和12.3像元 [24]。

飞行中定标活动 [24] 旨在实际运行条件下改进探测器表征，并考虑发射应力、热循环、辐射暴露和零重力效应；这些因素无法在地面上完全模拟。偏置图样稳定在 $\sim$151 DN，标准差为 3.4 DN，读出噪声为 $\sim$8DN。曝光时间为 $\leq$100 ms 时，暗电流可忽略不计，这证实

计划在小行星阶段进行的短曝光无需进行暗场校正。探测器线性度通过 $R^2 = 0.9997$ 得到确认。通过观测一颗亮星（织女星）对点扩散函数进行了表征，测得沿两个探测器轴的半高全宽分别为 1.54 和 1.60 像元，与 1.6 像元的飞行前数值一致。利用 71 张星场帧和 312 次恒星检测对几何畸变进行了校正，沿 X轴和Y轴的均方根残差分别为 0.36 和 1.87 像元，较飞行前校正 [24] 有显著改善。

辐射定标采用恒星观测进行，并从中提取了 367 个恒星轮廓。所得在轨灵敏度常数与飞行前数值相差约 10%，这归因于太空中的工作温度较低（-12°C，而实验室中为 $+20^{\circ}$C）。对五个火星表面区域的 CRISM 数据进行初步比较后，发现存在系统性的通道相关偏移，因此开展了本文所述的扩展交叉定标。该流程生成的定标图像构成了我们分析的起点 [24]。

HS-H 光谱的不确定度由三项组成。第一项是探测器噪声。由于宏像元的 25 个光谱采样点各由一次曝光中的一个子像元提供，在火星影像的均匀区域测得单个宏像元光谱的波段间散布为 3–5%，并根据各区域的信号水平进行缩放，对应于每个光谱采样点的信噪比为 20 至 33。随着对 $N^{-1/2}$ 个宏像元取平均，该项会降低至原来的 N，对于涵盖本文所研究区域的 N 在 90 至 105 之间时，其数值降至 0.3–0.5%。第二项是飞行中的辐射定标常数的相对光谱不确定度，视通道而定，范围为 0.3% 至 0.9%，且不会因平均而降低；相对于 0.806 μm 处的归一化通道，其平均值为 0.74%。第三项是 1.3% 的绝对辐射不确定度，该不确定度对全部 25 个通道均相同：它作为整个光谱的比例因子，不会影响波段间散布，并且在归一化光谱和归一化校正因子中会完全抵消。合并前两项后，区域平均 HS-H光谱每个波段的不确定度为 0.9–1.0%，以下将此值作为 HS-H 光谱的不确定度。该估算与数据相符。我们对每个区域平均光谱拟合了平滑的多项式连续谱，并测量了其周围 25 个

点的散布。HS-H 的散布为 0.6–1.3%，而同一区域的 OMEGA 和 CRISM 为 0.3–0.4%。这只是一个上限，因为视场内实际的光谱变化也可能有所贡献。平场校正已应用于标定产品，任何残差都包含在上述波段间散布中。

2.3. HS-H 数据集

本研究使用了三幅火星表面 HS-H图像，采集时间为2025年3月12日12:15:45.944至12:29:45.979协调世界时，曝光时间为0.01 s（表1）。这三幅图像的编号分别为 HS-L0-FE-025D-04-01、HS-L0-FE-025D-05-01 和 HS-L0-FE-025D-06-01。在此采集时段内，探测器与火星的距离从 20 924.8 km缩短至14 521.4 km，对应的空间采样范围为每个宏像元13.8至9.6 km。与飞掠期间更早采集的图像相比，我们选择了这三幅图像，因为它们的空间采样更精细，更适合与 OMEGA 和 CRISM数据进行比较。三幅图像中相位角、出射角和入射角的空间分布如图1所示。

图像采用第 2.2 节所述的现有标定流程进行处理，包括偏置扣除、平场校正、坏像元插值和几何畸变校正。辐射定标通过将数字量化计数（DN）除以 Prodan 等人推导的在轨灵敏度因子 [24]（见其中的表 5）完成，从而将数据转换为 $W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$单位。随后，将所得辐亮度图像除以波段平均太阳辐照度值 [24] ，得到反射率因子（I/F）图像。对于每幅 HS-H 图像，在轨校准流程 [24]生成了分别存储为 FITS文件的纬度、经度、相位角、出射角和入射角配准地图。这些地图与 HS-H 科学图像使用相同的像素网格，因此可以逐像素获取几何条件。随后使用逐像素几何信息表征各选定表面区域的观测条件，如第 3.2.1 节所述。

表1：本研究使用的三幅HS-H图像的观测参数。这些图像于2025年3月12日在赫拉火星飞掠期间获取。纬度和经度以每幅图像有效像素范围内的最小值/最大值表示。相位角、出射角和入射角以每幅图像有效像素范围内的平均值表示。空间采样根据航天器—火星距离和0.66毫弧度的宏像元瞬时视场计算得出。

图像编号	协调世界时开始时间	t_{exp} (s)	距离 (km)	空间采样 (km Mpx^{-1})	纬度范围 (°)	经度范围 (°)	相位角 (°)	出射角 (°)	入射角 (°)
HS-L0-FE-025D-04-01	12:15:45.9	0.01	20924.8	13.8	−38.24 / 29.84	−28.98 / 81.08	23.40	34.15	36.23
HS-L0-FE-025D-05-01	12:22:46.9	0.01	17610.2	11.6	−36.89 / 18.84	−9.72 / 70.94	28.62	27.95	36.08
HS-L0-FE-025D-06-01	12:29:45.9	0.01	14521.4	9.6	−37.06/ 6.69	3.67 / 64.55	36.36	22.58	40.06

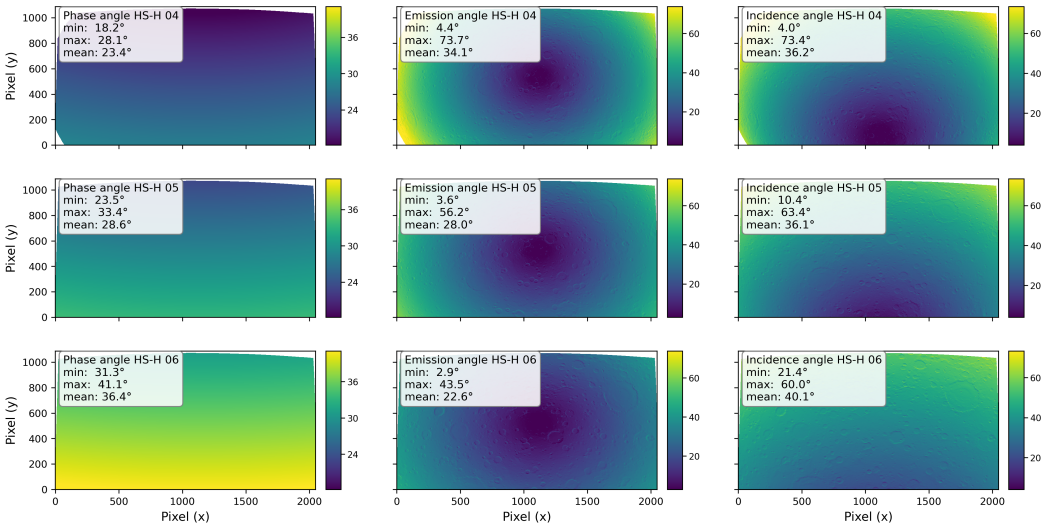


图1：本文所用三幅HS-H图像的相位角（左）、出射角（中）和入射角（右）的空间分布（从上到下依次为：HS-L0-FE-025D-04-01、HS-L0-FE-025D-05-01、HS-L0-FE-025D-06-01）。数值以度为单位。无效的边界像元以白色显示。这些分布图展示了本文分析的观测的照明条件。

3. OMEGA 和 CRISM

3.1. OMEGA 和 *CRISM* 数据集

本研究使用的 CRISM数据产品为可见光—近红外高光谱缩减数据记录（VRDR），即由多条可见光近红外高光谱制图观测条带拼接而成的地图投影镶嵌图，并以全球网格上的分块形式发布，每块约为 $5^\circ \times 5^\circ$ [29]。其处理过程包括朗伯光度校正和火山扫描大气校正。此外，还应用了经验校正以去除

光谱笑脸效应。VRDR产品覆盖可见光/近红外范围（0.37–1.02 μm），提供的光谱已表示为反射率因子（I/F 除以入射角的余弦），其光谱分辨率达到 VNIR 探测器的全分辨率；要与 HS-H 滤波器传递函数进行卷积，就需要这样的分辨率。由于每个瓦片都是由不同时期获取的条带拼接而成，因此第3.4节所述的太阳经度筛选是在像元级别进行的，而非针对整个产品。

选择 OMEGA 和 CRISM 参考数据集时，使其覆盖范围与 HS-H图像 HS-L0-FE-025D-04-01 覆盖的地表区域相匹配；在本研究使用的三幅图像中，该图像的地理覆盖范围最广（表1）。在图像的纬度和经度范围内，共确定了21个地表区域用于光谱提取。本研究中使用的区域名称沿用初次筛选时所赋予的名称，因此并非连续编号，因为其中一些区域随后依据下文所述的筛选标准被剔除。图2显示了这21个选定区域在三幅 HS-H图像上的位置。

在对 HS-H 图像应用通量色彩图以区分亮色和暗色地形后，通过目视方式选取了这些区域。图3展示了三个所选区域的代表性示例——亨利陨石坑、区域1（暗色地形）和区域22（亮色地形）——以及 HS-H、OMEGA 和 CRISM 对这些区域的观测结果。选取这些区域旨在涵盖多种地表类型、陨石坑底部和坑缘（Huygens、Schiaparelli 和亨利陨石坑）、亮色和暗色地形、图像边界区域，以及分布于场景各处的其他区域，从而确保对所观测地表具有代表性的覆盖。覆盖这21个区域的 OMEGA观测取自 ESA 行星科学档案馆[1] ，以光谱图像立方体（.QUB）及其配套导航文件（.NAV）的形式提供。共选取了来自26个不同轨道的37次 OMEGA观测，并为每个区域选取多个轨道，以提高比较的统计稳健性。由于单次观测可能覆盖多个区域，这些观测产生的区域–观测对数量更多。覆盖同样21个区域的 CRISM观测取自 PDS地球科学节点[2], ，以 VNIR产品的形式提供。光谱提取流程以及用于

[1]https://psa.esa.int/psa/[2]
https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/crism.htm

从两台仪器中选取最终47条光谱的标准见第3.4节所述。本研究使用的OMEGA观测空间采样范围为每像元0.8至4.0千米，中位数为1.9千米；而CRISM VRDR 瓦片以每度256个像元进行地图投影，相当于每像元约230米。

本节安排如下。第 3.2.1、3.2.2 和 3.2.3 节介绍三台仪器的光谱提取流程。第 3.3 节介绍光谱预处理，包括应用 HS-H 滤光片传递函数。第 3.4 节介绍用于筛选纳入比较的 OMEGA 和 CRISM 观测的标准。第 4.2 和 4.3 节分别介绍根据归一化光谱和绝对通量光谱得到的校正因子。第 5.1 节评估三幅 HS-H图像之间结果的重复性和可靠性。最后，第 5.2 节分析绝对通量校正因子对观测几何参数和表面反照率的依赖性。

3.2. 数据获取

3.2.1. HS-H 光谱提取

首先，利用逐像元中心波长校准图 [23], 对每幅 HS-H图像进行波长校准，该校准图为每个子像素指定一个有效中心波长。HS-H 的宏像素架构中，每个 5×5 子像素矩阵对 25 个不同的光谱波段进行采样，Popescu 等人 [23]对此进行了详细描述。每幅图像还与由在轨校准流程 [24], 生成的纬度、经度、相位角、出射角和入射角配准地图进行配准，从而能够在子像素级别获取观测几何条件。

对于第3节所定义的21个表面区域中的每一个，均通过选取纬度与经度落在该区域边界范围内的全部子像素来构建地理掩膜。随后将所选子像素加以扩展，以纳入完整的宏像素；任何至少包含一个所选子像素的宏像元均被完整纳入提取范围，从而确保全部25个波段的光谱完整性。当该流程产生一个以上互不连通的区域时，仅保留最大的连通分量。

在进行光谱提取之前，将每个子像元的通量除以从逐像元入射角图中获取的局部入射角的余弦值，以校正照明几何。这一校正使

HS-H数据与OMEGA和CRISM采用相同的光度约定；后两者提供的数据已表示为反射率因子，即I/F 除以入射角的余弦值 [20, 29]。针对每个光谱波段，计算区域内所有有效子像元的平均通量和中位数通量，从而得到HS-H观测到的地表区域的平均光谱和中值光谱。每个区域所包含的子像元数量随区域大小而异；区域大小设定为与相应OMEGA观测的空间范围相匹配。对于给定的HS-H图像，落在其空间覆盖范围之外的区域不纳入该图像的分析。所得光谱以两列文本文件保存，其中包含25个波段各自的有效波长和通量值。按照第2.2节的误差预算，传播所得区域光谱中每个波段的不确定度：将随平均的宏像元数量增加而降低的探测器噪声，与不会随之降低的相对光谱定标不确定度合并计算。

3.2.2. OMEGA 光谱提取

OMEGA观测采用 omegapy Python 库 [28], （官方 OMEGA IDL 流程的重新实现）进行处理。对于每次观测，从 ESA 行星科学档案馆下载的 1B 级二进制文件（ .QUB 和 .NAV ）会被加载，并通过热辐射和大气校正函数（corr_therm_atm）进行处理。该函数应用火山扫描大气校正 [28] ，并去除较长波长处的热辐射贡献。输出为反射率因子数据立方体（cube_rf），其定义为辐亮度因子除以入射角的余弦；这与 Mustard 等人 [20] 所述的光度约定一致，也与第 3.2.1 节中所述对 HS-H 数据应用的校正一致。

针对 21 个表面区域中的每一个，均检索并处理了覆盖该区域的所有可用 OMEGA观测。每个 OMEGA观测由一个形如 ORBXXXX_X 的标识符标识，其中 ORBXXXX 表示火星快车号轨道，即一次飞越火星表面的过程，后缀则标识该轨道期间获取的单个数据立方体。因此，单个轨道可以提供多个观测。针对每个区域，定义了一个经纬度边界框，并选取了空间覆盖范围与该边界框重叠的所有轨道。中位数

反射光谱取自每个轨道在边界框内的所有有效像元。如果某个轨道仅覆盖所选区域的一部分，则仅使用其覆盖范围内重叠区域的像元。由于单个轨道可能与多个区域重叠，而单个区域也可能由多个轨道覆盖，因此轨道—区域对总数（47 个，来自 26 个不同轨道）超过了区域数量。

按照第3.2.3节所述，使用相同的经纬度边界框提取相应的CRISM光谱。对于每次OMEGA观测，通过选取纬度和经度均位于相应表面区域边界内的所有像元，构建地理掩膜；这些边界在制图文件中定义。随后对所有选定像元计算平均反射率光谱和中位数反射率光谱，从而获得覆盖完整OMEGA波长范围的两条连续光谱。所选区域内没有有效像素，或受到饱和及其他数据质量问题影响的观测将被排除。所得光谱被保存为两列文本文件，其中包含OMEGA波长数组以及相应的平均或中位数反射率值。由于0.930 μ米以后的OMEGA光谱采样点受到高阶光栅级次污染的影响，因此不会在数据产品中提供，导致反演光谱在约0.930至1.040 μ米之间存在间隔，故在后续分析中将最后三个HS-H波段（0.934、0.944和0.952 μ米）从OMEGA对比中排除。附录中的表 A.5汇总了所使用的全部OMEGA观测，以及与之关联的表面区域、坐标边界和观测几何。

*3.2.3. CRISM*光谱提取

覆盖所选 21 个表面区域的 CRISM 观测通过专用 Python处理流程进行处理。输入数据为从 PDS 地球科学节点获取的可见光—近红外高光谱缩减数据记录（VRDR），波长范围为 0.37–1.02 μm。VRDR产品包含第 3.1 节所述的校正，包括朗伯光度校正和火山扫描大气校正 [13]（这是一种针对火星大气的标准经验校正，基于在多个海拔高度对奥林帕斯山进行的观测），并提供已表示为反射率因子（I/F 除以入射角余弦）的光谱，与 OMEGA 和 HS-H 使用的光度约定一致。除数据产品中已包含的校正外，未再进行其他校正

在数据产品中。

对于每次观测和每个表面区域，在光谱提取前，会屏蔽缺失值或物理上无效的像元，这些像元被识别为非有限值或低于 -10^{30} 的值。随后，使用制图文件中定义的相同纬度和经度边界，计算所选地理区域内所有有效像元的平均反射率光谱和中位数反射率光谱。最终得到的光谱以两列文本文件的形式保存，其中包含 CRISM 波长数组及相应的反射率值。

第3.4节开头定义的太阳经度判据也应用于CRISM数据，但由于产品性质不同，其实施方式与 OMEGA 的情况有所差异。VRDR 瓦片是由不同时期、因而也处于不同季节的多次采集数据拼接而成的镶嵌图，因此无法将该判据应用于整个产品。在这些情况下，光谱提取仅针对区域中由落在所采用的L_s时间窗口内的采集数据所覆盖的部分进行；计算平均光谱和中位数光谱前，则会屏蔽其余像元。完整镶嵌图仅为提供背景信息而展示在图 3 中，并未用于推导校正因子。在后续分析流程中，保留了 HS-H 波长范围内的 CRISM 光谱值。不过，CRISM 的 VNIR 探测器采用双段式分级滤光片，其接合处位于 0.65 μm 附近；该处被一条不透明条带遮挡，使约 0.61 至 0.71 μm 范围内的信号衰减 [19]。本文所用产品未提供受影响的通道，因此反演光谱在约 0.638 至 0.690 μm 之间存在缺口。前三个 HS-H 波段（0.661、0.670 和 0.688 μm）落在该缺口内，因此未纳入与 CRISM 的比较。分析中共使用了 47 次 CRISM 观测，其覆盖范围与第 3.2.2 节所述的 OMEGA 观测具有相同的行星orpaϕ坐标。

3.3. 光谱预处理

为了实现 HS-H、OMEGA 和 CRISM 之间的直接光谱比较，必须应用 HS-H 滤光片传递函数（公式 1），将 OMEGA 和 CRISM 的连续光谱投影到与 HS-H 相同的 25 个光谱波段上。对于每个光谱波段 i，合成 HS-H 等效值通过对输入光谱 $S(\lambda)$ 与

滤光片传递函数 $F^i(\lambda)$ 的乘积进行积分获得，并以 λ 加权，以计及频率域与波长域之间的转换。平均光谱和中值光谱均通过该程序独立处理。

预处理流程由三个连续步骤组成。归一化步骤以相同方式应用于 OMEGA、CRISM 和 HS-H，而滤光片积分仅涉及 OMEGA 和 CRISM，因为 HS-H 已经原生采样了 25 个波段。首先，对每条光谱在 0.80 μm 处进行归一化，该值计算为窗口$[0.78, 0.82]$ μm 内所有光谱值的中位数，以消除绝对通量水平的影响，并将所有光谱置于统一的相对尺度上。此步骤在滤光片积分之前执行。随后，根据公式 1 对归一化光谱进行积分，以生成 25 波段合成光谱。最后，将所得光谱再次在 0.80 μm 处进行归一化，以消除离散积分引入的任何残余数值偏移。图 4 展示了一个代表性表面区域所得归一化光谱的示例。

在预处理之前，对 OMEGA 和 CRISM 光谱进行了质量筛选。受饱和、低信噪比影响或包含无效值的观测均被舍弃。落在特定 HS-H 图像空间覆盖范围之外的表面区域也被排除。除这些自动筛选标准外，在完成光谱提取和归一化后，还对所有光谱进行了目视检查。对于 HS-H 光谱信噪比不足、存在明显噪声特征或在图像视场内空间覆盖不完整的区域，均予以舍弃。此外，还排除了由明暗地形异质混合构成的区域，因为在此类情况下，HS-H 与 OMEGA 之间的空间分辨率不匹配会使光谱比较不可靠。

3.4. 观测筛选

这三幅 HS-H 图像是在太阳经度 $L_s \simeq 55.7°$ 时获取的，即北半球春季、接近远日点时。此季节大气尘埃光学厚度达到全年最低值，而 $L_s = 180°$ 至 $L_s = 360°$ 期间涵盖沙尘暴季，在此期间柱光学厚度可能大幅增加，有时甚至会演变为全球性事件 [17, 26]。由于尘埃散射会提高 HS-H 波段较短波长处的表观反射率，并使光谱斜率变平，因此若将 HS-H 光谱与在尘埃负荷显著更高的条件下获取的参考光谱进行比较，

就会引入无法与仪器因素区分的季节性偏差。因此，比较中仅保留了在 $L_s = 0°$ 至 $L_s = 180°$ 之间获取的 OMEGA 和 CRISM 观测，即北半球春季和夏季期间的观测。照明几何方面还采用了第二项筛选标准：剔除了 OMEGA 太阳入射角大于 55° 的观测，因为在掠射照明条件下，三个数据集共用的朗伯光度校正会变得越来越不准确，且表面受局部地形的影响更大。这两项标准均应用于观测，而非仪器，因此 OMEGA 和 CRISM 的比较采用相同的观测时段，两个参考数据集也在相同的季节和照明条件下对相同的表面进行采样。在最初可用的观测中，筛选后保留了 47 对区域—轨道，分布于 21 个表面区域和 26 条不同的火星快车号轨道。保留的观测及其观测几何列于表 A.5，相应的光度角范围汇总于表 2。

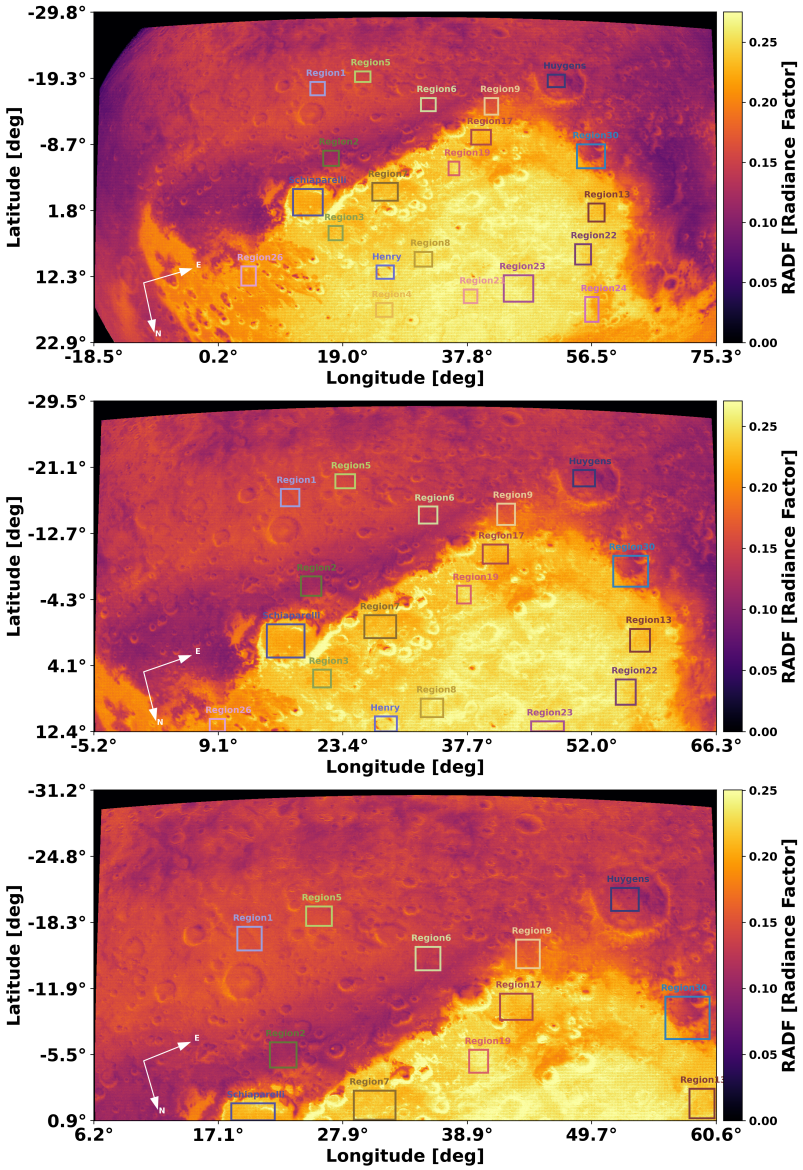


图2：本研究使用的三幅HS-H图像（HS-L0-FE-025D-04-01、HS-L0-FE-025D-05-01和HS-L0-FE-025D-06-01，从上到下排列），图中叠加显示了以彩色矩形标出的21个选定表面区域。坐标轴显示了纬度和经度。每个矩形的颜色用于标识区域类型：陨石坑（Huygens、Schiaparelli、Henry）和其他表面区域（区域1–区域30）。区域名称沿用了原始筛选中的名称，因此并非连续编号，因为部分区域未通过筛选标准。

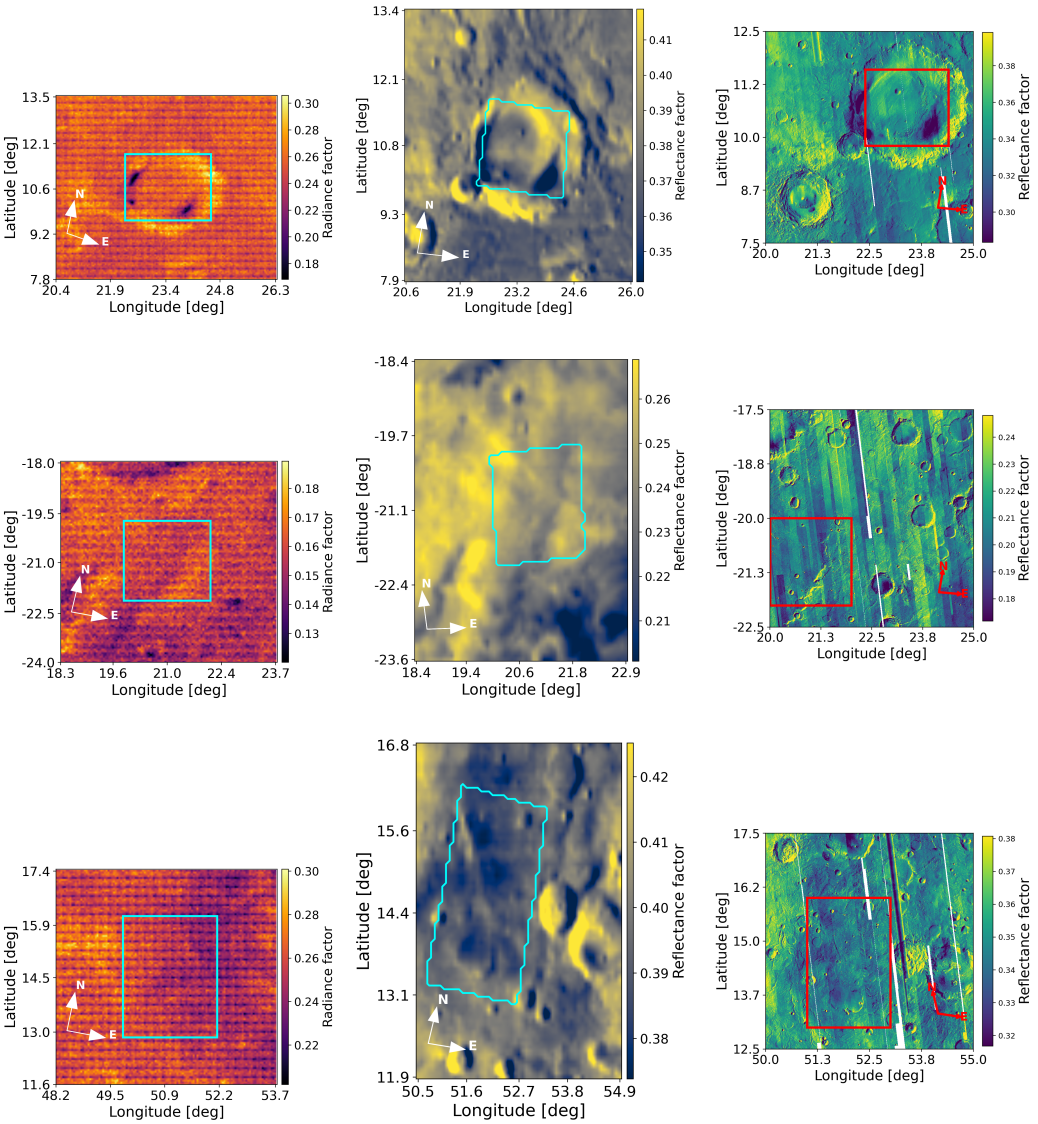


图3：HS-H（左列）、OMEGA（中列）和 CRISM（右列）观测到的三个选定表面区域的代表性示例。从上到下依次为：亨利陨石坑、区域1（暗色地形）和区域22（亮色地形）。青色轮廓线（HS-H 和 OMEGA）和红色矩形（CRISM）标示了用于光谱提取的区域。所有面板中，北方朝上，东方朝右。HS-H 面板显示辐亮度因子 I/F，OMEGA 和 CRISM 面板则显示数据产品提供的反射率因子；分析中使用的所有光谱均为反射率因子，即 I/F除以太阳入射角的余弦（第3.2.1节）。OMEGA 图像分别为北半球春季或夏季的轨道0558_4 ($L_s = 53.1°$)、轨道1505_5 ($L_s = 178.5°$)和轨道0554_4 ($L_s = 52.6°$)。CRISM 镶嵌图仅用于提供背景信息；光谱提取自满足 L_s 条件的像元。19

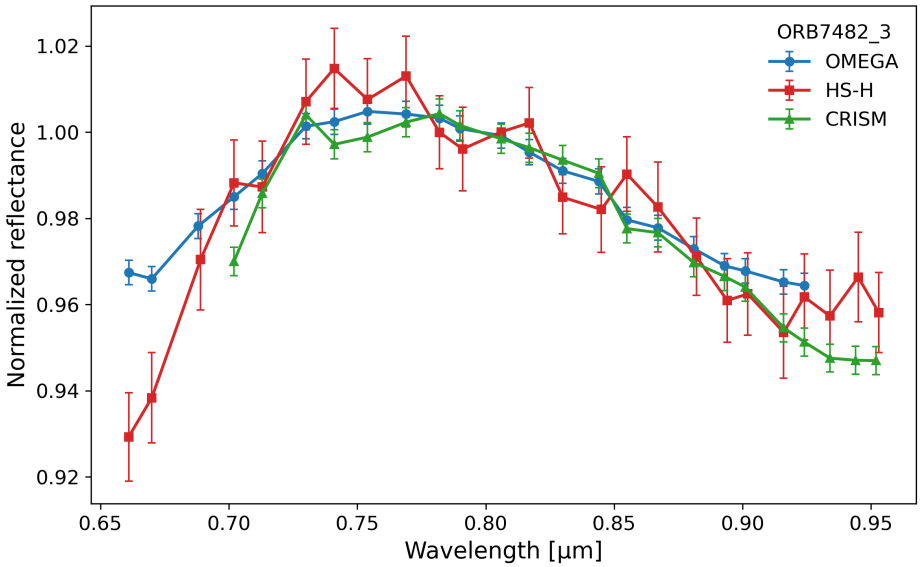


图 4：惠更斯陨击坑区域（$ORB7482_3$）的归一化光谱示例，由 HS-H（红色）、OMEGA（蓝色）和 CRISM（绿色）观测获得；应用 HS-H 滤光片传递函数并在 0.80 μm 处进行归一化后所得。HS-H 光谱的误差条结合了该区域内 94 个宏像元平均后的光子噪声和读出噪声，以及相对光谱定标不确定度，具体如第 2.2 节所述。1.3% 的绝对辐射不确定度对所有 25 个通道均相同，并在归一化过程中抵消，因此未显示。OMEGA 和 CRISM 光谱的误差条表示各光谱相对于平滑连续谱的波段间散布。

4. 结果

4.1. 空间匹配

对 HS-H、OMEGA 和 CRISM 进行交叉标定的关键要求，是为所有观测定义一个通用的参考坐标系。对于在火星表面获取的图像，我们采用以纬度和经度表示的火星行星orpaϕ坐标。OMEGA 和 CRISM 数据集已包含以火星纬度和经度为参考的空间信息。

为了为每个 HS-H 像素分配纬度和经度坐标，我们使用了欧空局赫拉号 SPICE 内核数据集 [10]。SPICE 是 Spacecraft、Planet、Instrument、C-matrix 和 Events 的首字母缩写，是一种由数据文件（称为内核）和软件例程组成的信息系统，用于计算航天器搭载仪器所获取观测的几何参数。因此，我们提取了与 HS-H 指向几何相对应的纬度和经度信息，包括相机中心和图像角点。随后，通过应用相应的畸变校正，将 HS-H 视场畸变模型 [24]纳入考虑，从而为每个子像素分配纬度和经度坐标。

在进行光谱提取之前，我们对全部 21 个地表区域的 HS-H 与 OMEGA 数据集之间的行星地理配准进行了目视评估。对于每个区域，我们都将用于光谱提取的经纬度边界框叠加在 HS-H 图像及对应的 OMEGA 图像上。随后通过目视检查确认所选区域的空间重合情况。比较时参考了明显的地貌特征，包括撞击坑、地形变化以及其他可识别的地表结构。这些特征作为空间参考标记，用于评估数据集之间配准的一致性。在所检查的各个区域中，未发现目视可辨的差异或空间偏移，这证实了用于比较的区域尺度上配准准确。

4.2. 归一化光谱比较

HS-H 与 OMEGA 之间以及 HS-H 与 CRISM 之间的波长相关校正因子，是根据第 3.3 节所述的归一化光谱推导得出的。对于每个表面区域和每次 OMEGA 观测，波段 i 处的校正因子定义为归一化

表 2：根据第3.4节所述的太阳经度和入射角筛选后，保留用于比较的 OMEGA、CRISM 和 HS-H 观测的光度角。数值为保留的 47 个区域—轨道对中的最小值和最大值，括号内为平均值。所有角度均以度为单位。

仪器	相位角	出射角	入射角
OMEGA	17.0–54.6（33.5）	2.2–7.7（4.3）	16.9–54.0（33.1）
CRISM	41.1–62.1（51.8）	0.5–5.8（1.5）	41.4–62.1（52.1）
HS-H（04）	19.8–27.2（23.6）	3.9–37.3 (20.7)	6.8–44.2（25.0）
HS-H（05）	25.6–33.3（29.6）	5.7–39.8（20.9）	10.2–45.2（27.5）
HS-H (06)	34.6–41.0（37.9）	1.0–36.6（19.4）	22.1–46.3（34.0）

HS-H 光谱与应用 HS-H 滤光片传递函数后的归一化 OMEGA（或 CRISM）光谱之比：

$$C^i = \frac{S^i_{\mathrm{HH,\,norm}}}{S^i_{\mathrm{OMEGA,\,norm}}} \tag{3}$$

其中，$S^i_{\mathrm{HH,\ norm}}$ 和 $S^i_{\mathrm{OMEGA,\ norm}}$ 分别表示 HS-H 和 OMEGA 在波段 i 处的归一化反射率值。CRISM 也适用同样的定义。校正因子分别根据平均光谱和中值光谱独立计算；由于两者在所有区域和波段上的差异均小于 0.2%，因此下文仅给出中值结果，因为它们对离群值更为稳健。

对于每个波段，均针对每次 OMEGA 观测和每个表面区域分别计算校正因子。随后计算所有观测和区域的中位数与标准差，以稳健估算仪器之间的系统偏移。此过程针对三幅 HS-H图像（HS-L0-FE- 025D-04-01、HS-L0-FE-025D-05-01 和 HS-L0-FE-025D-06-01）分别独立进行，下文将其称为图像 04、05 和 06。最终校正因子取三幅图像各自估算值的中位数；不确定度则取三幅图像之间的标准差与各图像不确定度中位数中的较大值，以确保误差估计偏保守。

所得校正因子如图5所示，并列于表3中。对于 HS-H/OMEGA，大多数波段的校正因子接近于 1。

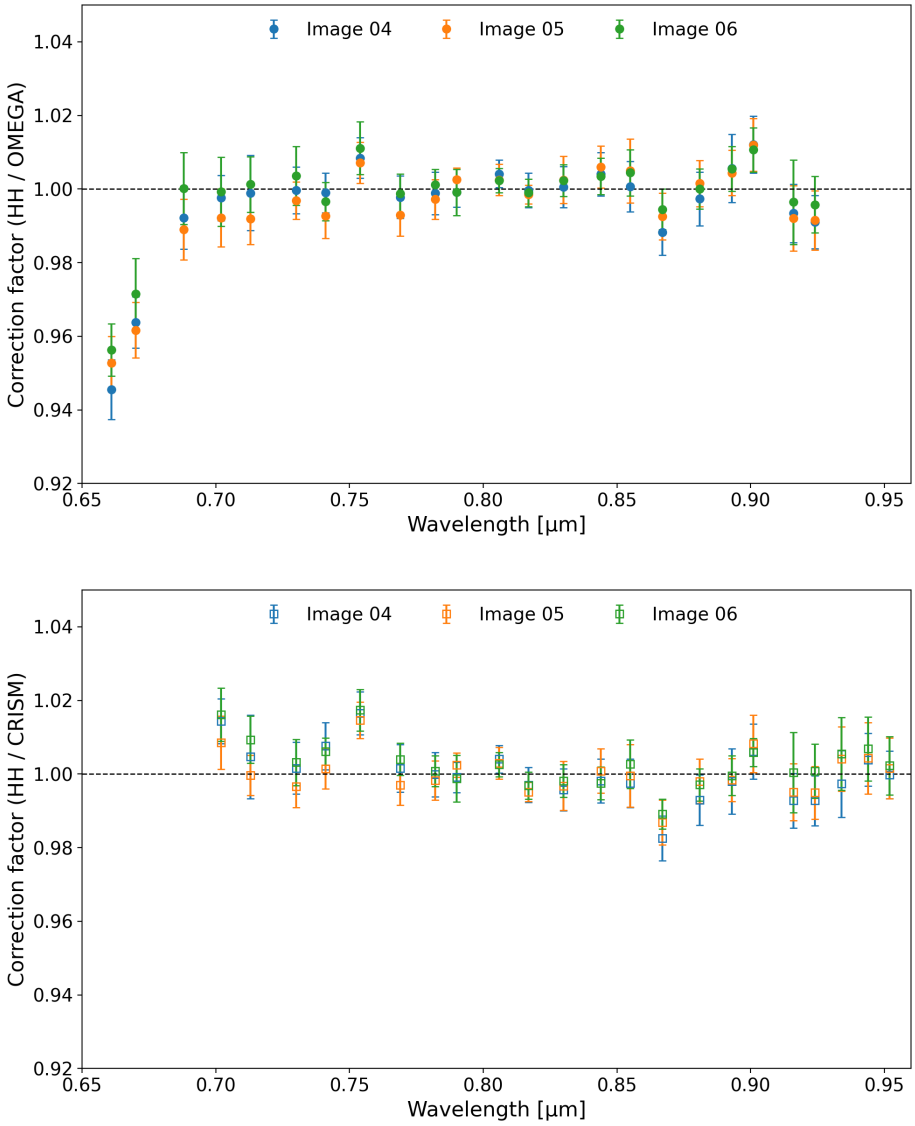


图 5：HS-H 与 OMEGA（上图）以及 HS-H 与 CRISM（下图）之间的波长相关校正因子 C^i，由 21 个选定表面区域的归一化光谱得出。蓝色、橙色和绿色数据点分别对应 HS-H 图像 04、05 和 06。误差条表示所有表面区域中校正因子的标准差。位于 1 处的水平虚线表示仪器之间完全一致。

相对异常值对应第 1 和第 2 波段，其数值分别为 0.9527 ± 0.0072 和 0.9639 ± 0.0075，对应波长 0.661 和 0.670 μm，表明两个最短波长波段存在 4.7% 和 3.6% 的系统偏移。从第 3 波段（0.688 μm）开始，校正因子接近 1，所有波段的标准差均低于 1%。第 3–22 波段的校正因子中位数为 0.9991 ± 0.0052。

对于 HS-H/CRISM，从第 4 波段（0.702 μm）开始，校正因子接近 1；第 4–22 波段的校正因子中位数为 0.9995 ± 0.0066 。少数通道，尤其是第 8、17 和 20 波段，与 1 的偏差最高达 1.7%，且在 OMEGA 对比中偏差符号相同。这些残差可能源于 HS-H 的相对光谱定标，也可能源于两个参考数据集之间的差异；波长相关校正因子正是用于校正这些残差。第 4 波段情况特殊，因为它位于 0.638 和 0.690 μm 之间的 CRISM 光谱间隙边缘，HS-H 传递函数在此处部分通过外推求得。

4.3. 辐射校正因子

第4.2节所述的校正因子是根据归一化光谱推导得出的，因此仅反映仪器响应随波长变化的形状，不包含绝对反射率水平的信息。各通道对应的辐射校正因子可直接由第4.2节推导出的相对校正因子获得：将其乘以一个常数（称为辐射校正因子），该常数定义为 0.80 μm 处 HS-H 与 OMEGA（或 CRISM）反射率之比（即先前进行归一化时所用的同一波长）。对于 HS-H/OMEGA 和 HS-H/CRISM，该辐射校正因子分别为 0.9209 ± 0.0095 和 0.9933 ± 0.0160 ，计算时分别采用波段 3–22 和波段 4–22。

OMEGA、CRISM 和 HS-H 这三种仪器均按照等效的光度学约定 [20, 29]，将数据转换为反射率因子（I/F 除以入射角的余弦）。因此，仪器间观测到的绝对通量差异并非仅由光度学约定的差异造成，也可能是多种因素共同作用的结果，包括仪器绝对辐射定标中的残余差异，以及入射角余弦的处理方式不同所造成的差异。

表3：基于 L_s 位于0°至180°之间且太阳入射角低于55°的轨道，得出的HS-H相对于火星快车/OMEGA和火星勘测轨道飞行器/CRISM的归一化校正因子。数值为三幅HS-H图像（04、05、06）的中位数；不确定度取三幅图像之间的离散度与各表面区域逐图像离散度的中位数中的较大值。最后一行的中位数取自对应列所列波段，不确定度为这些波段的离散度。前三个波段未被CRISM覆盖，最后三个波段未被OMEGA覆盖。

Band	λ [μm]	CF(HS-H /OMEGA)	CF(HS-H /CRISM)
1	0.661	0.9527 ± 0.0072	—
2	0.670	0.9639 ± 0.0075	—
3	0.688	0.9922 ± 0.0086	—
4	0.702	0.9976 ± 0.0079	1.0144 ± 0.0072
5	0.713	0.9990 ± 0.0075	1.0047 ± 0.0064
6	0.730	0.9996 ± 0.0063	1.0016 ± 0.0063
7	0.741	0.9966 ± 0.0054	1.0061 ± 0.0054
8	0.754	1.0084 ± 0.0056	1.0165 ± 0.0056
9	0.769	0.9978 ± 0.0057	1.0015 ± 0.0055
10	0.782	0.9989 ± 0.0054	0.9999 ± 0.0053
11	0.790	0.9992 ± 0.0040	0.9991 ± 0.0041
12	0.806	1.0025 ± 0.0038	1.0030 ± 0.0037
13	0.817	0.9990 ± 0.0037	0.9969 ± 0.0037
14	0.830	1.0023 ± 0.0056	0.9968 ± 0.0057
15	0.844	1.0041 ± 0.0057	0.9982 ± 0.0060
16	0.855	1.0044 ± 0.0068	0.9995 ± 0.0066
17	0.867	0.9926 ± 0.0062	0.9868 ± 0.0060
18	0.881	1.0000 ± 0.0062	0.9971 ± 0.0060
19	0.893	1.0055 ± 0.0062	0.9984 ± 0.0058
20	0.901	1.0120 ± 0.0072	1.0061 ± 0.0075
21	0.916	0.9934 ± 0.0089	0.9951 ± 0.0077
22	0.924	0.9915 ± 0.0077	0.9949 ± 0.0072
23	0.934	—	1.0041 ± 0.0090
24	0.944	—	1.0044 ± 0.0087
25	0.952	—	1.0016 ± 0.0080
中位数		0.9990 ± 0.0131	1.0007 ± 0.0062

该角度是相对于参考表面计算的，同时还考虑了观测几何的影响：不同仪器观测同一表面区域时，其相位角、出射角和入射角各不相同。

最终的辐射校正因子（辐射校正因子与归一化光谱所用校正因子的乘积）如图6所示。在所有波段上，这三幅图像在各自的不确定度范围内彼此一致，证实了测量的重复性。

对于HS-H/OMEGA，校正因子在0.855 μ m处为 0.8968 ± 0.0390，在0.806 μ m处为 0.9397 ± 0.0379 ，波段3–22的中位数为0.9209 ± 0.0095 。这表明HS-H测得的绝对通量系统性地比OMEGA低约8%。每个波段约0.04的不确定度反映了所选21个区域的表面亮度变化。对于HS-H/CRISM，校正因子在0.855 μ m处为 0.9594 ± 0.0459，在0.702 μ m处为 1.0219 ± 0.0492，波段4–22的中位数为 0.9933 ± 0.0160 。这表明HS-H与CRISM的绝对通量非常吻合，残余偏差不到1%。相应的不确定度约为0.045，略高于OMEGA对比中的不确定度。两种偏差实际上均与波长无关：各波段辐射校正因子的变化幅度与单个波段的不确定度相当，而表3中的归一化校正因子精度高出数倍，在相同波段范围内仅变化2%至3%。这表明辐射差异是乘性的，不会扭曲光谱形状，这一特性有利于未来的科学应用。

图7所示的代表性光谱展示了三台仪器在各个区域的相对通量和绝对通量方面的典型表现。在归一化情形下，三台仪器的光谱形状吻合良好，证实第4.2节推导出的波长相关校正因子接近于1。在绝对通量方面，HS-H与CRISM吻合良好，但测得的辐射通量系统性低于OMEGA，这与本文报告的校正因子一致。值得注意的是，OMEGA与CRISM的绝对通量并非总是一致——这种表现因区域而异，与两台仪器对同一地表区域的观测几何不同相符。关于绝对校正因子对观测几何的依赖性分析

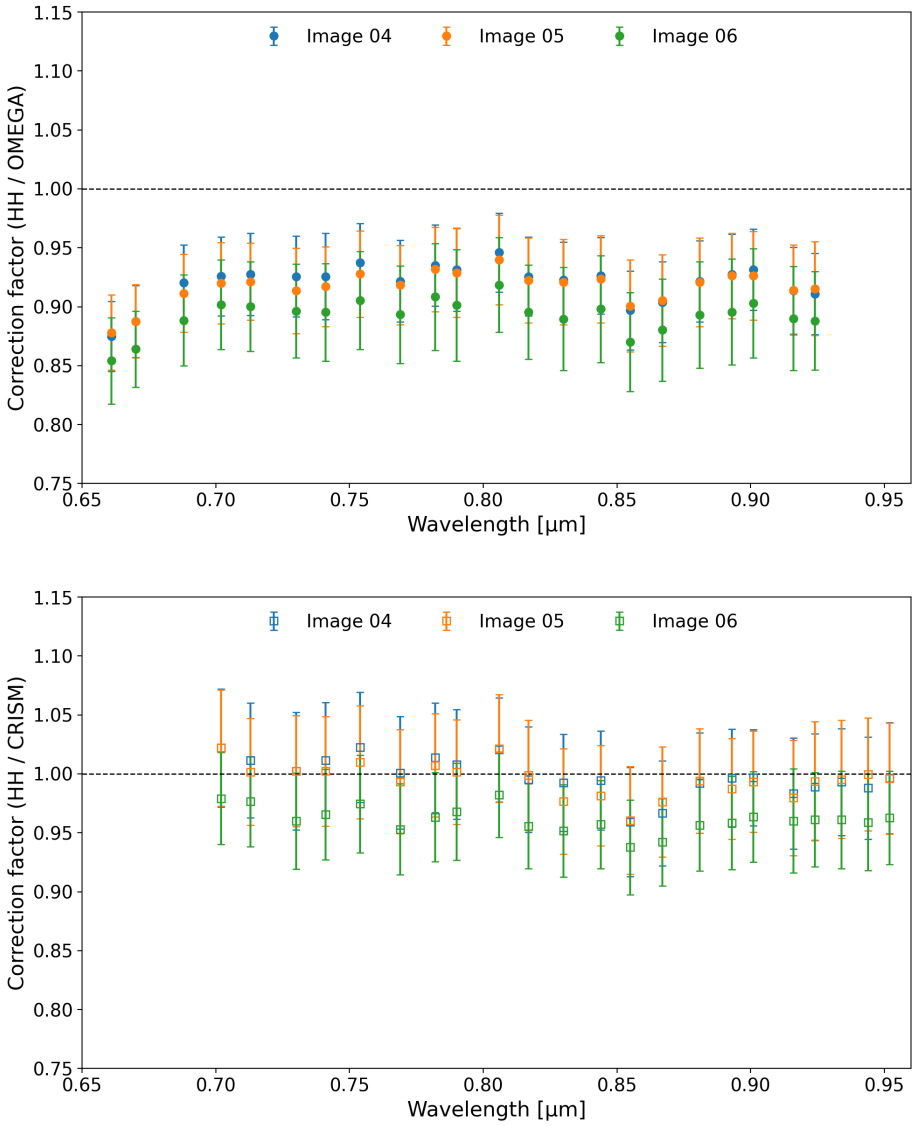


图 6：HS-H 与 OMEGA（上图）以及 HS-H 与 CRISM（下图）之间的波长相关绝对校正因子 C^{i}_{abs} 。蓝色、橙色和绿色数据点分别对应 HS-H 图像 04、05 和 06。误差条表示所有表面区域的标准差。位于 1 处的水平虚线表示完全吻合。

见第5.2节。

表4：基于与表3相同的轨道筛选得出的HS-H相对于火星快车/OMEGA和火星勘测轨道飞行器/CRISM的绝对通量校正因子。这些数值是三幅HS-H图像（04、05、06）的中位数；不确定度取三幅图像之间的离散度与各表面区域逐图像离散度的中位数中的较大值。最后一行的中位数取对应列所列波段的中位数，不确定度为这些波段的离散度。前三个波段未被CRISM覆盖，后三个波段未被OMEGA覆盖。

Band	λ [μm]	CF(HS-H /OMEGA)	CF(HS-H /CRISM)
1	0.661	0.8748 ± 0.0319	—
2	0.670	0.8877 ± 0.0311	—
3	0.688	0.9114 ± 0.0330	—
4	0.702	0.9198 ± 0.0345	1.0219 ± 0.0492
5	0.713	0.9213 ± 0.0348	1.0016 ± 0.0453
6	0.730	0.9135 ± 0.0363	1.0023 ± 0.0470
7	0.741	0.9170 ± 0.0365	1.0022 ± 0.0464
8	0.754	0.9278 ± 0.0367	1.0099 ± 0.0466
9	0.769	0.9184 ± 0.0347	0.9933 ± 0.0442
10	0.782	0.9317 ± 0.0358	1.0071 ± 0.0437
11	0.790	0.9288 ± 0.0376	1.0016 ± 0.0442
12	0.806	0.9397 ± 0.0379	1.0204 ± 0.0441
13	0.817	0.9223 ± 0.0361	0.9951 ± 0.0447
14	0.830	0.9209 ± 0.0362	0.9765 ± 0.0413
15	0.844	0.9234 ± 0.0370	0.9815 ± 0.0421
16	0.855	0.8968 ± 0.0390	0.9594 ± 0.0459
17	0.867	0.9039 ± 0.0388	0.9665 ± 0.0445
18	0.881	0.9209 ± 0.0375	0.9922 ± 0.0426
19	0.893	0.9262 ± 0.0361	0.9873 ± 0.0416
20	0.901	0.9263 ± 0.0377	0.9933 ± 0.0409
21	0.916	0.9138 ± 0.0382	0.9797 ± 0.0472
22	0.924	0.9109 ± 0.0399	0.9888 ± 0.0450
23	0.934	—	0.9931 ± 0.0454
24	0.944	—	0.9879 ± 0.0432
25	0.952	—	0.9959 ± 0.0471
中位数		0.9203 ± 0.0144	0.9933 ± 0.0149

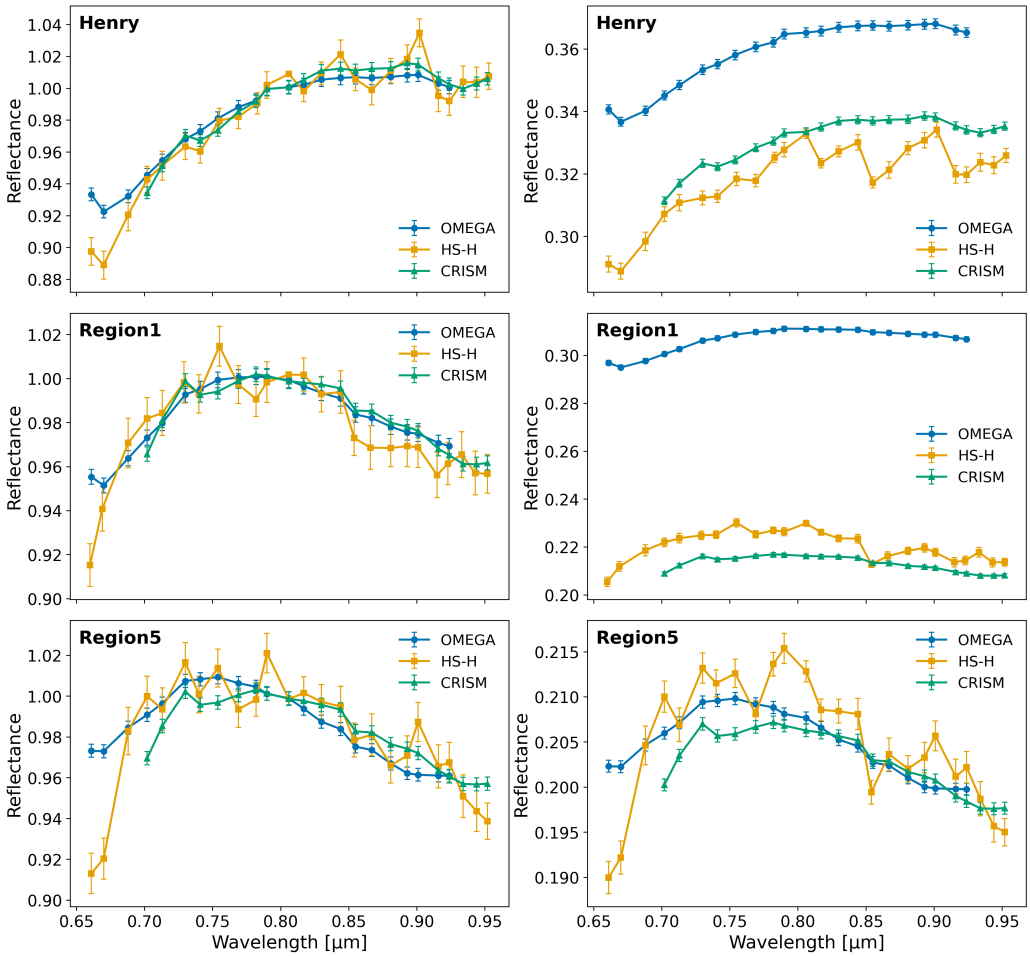


图 7：三个具有代表性的表面区域——亨利陨石坑（上）、区域1（中）和区域5（下）——的归一化光谱（左列）和绝对通量光谱（右列），分别由 OMEGA（蓝色）、HS-H（橙色）和 CRISM（绿色）观测得到。在归一化情形下，所有光谱均除以其在 0.80 μm 处的值。HS-H 光谱的误差条综合了各区域内取平均值的宏像元（亨利陨石坑、区域1和区域5分别为104、99和92个）的光子噪声与读出噪声，以及相对光谱定标不确定度，详见第 2.2 节。1.3% 的绝对辐射不确定度适用于所有 25 个通道：它在归一化图中相互抵消，在绝对通量图中则作为共同的比例因子，因此未予显示。OMEGA 和 CRISM 光谱的误差条表示各光谱相对于平滑连续谱的波段间散布。

5. 讨论

5.1. 测量的重复性和可靠性

本研究使用的三幅 HS-H图像（04、05 和 06）是在同一表面区域获取的，但它们与火星的距离不同（分别为 20924.8、17610.2 和 14521.4 km），且观测几何略有差异。对同一表面区域进行三次独立观测，使我们能够直接评估测量重复性及其可靠性。

对于相对校正因子，三幅 HS-H图像在全部 25 个光谱波段上均产生了高度一致的结果，如图5所示。基于三次估计逐波段计算得到的图像间标准差，其平均值对于 HS-H/OMEGA 为 0.22%，对于 HS-H/CRISM 为 0.20%。图像间标准差的最大值在 OMEGA 的 0.688 μm 处达到 0.47%，在 CRISM 的 0.713 μm 处达到 0.39%；任意两幅图像之间的最大点间差异分别为 1.13% 和 0.96%。这些数值与表3中报告的逐波段不确定度相当，证实了在对同一表面区域进行不同观测时，相对校正因子具有高度可重复性。

对于辐射校正因子，图像间的一致性仍然良好，但由于绝对通量对观测几何变化更加敏感，其离散程度有所增大。HS-H/OMEGA和HS-H/CRISM的平均图像间标准差分别为1.37%和1.70%；最大值分别为OMEGA在0.830 μm处的1.65%，以及CRISM在0.782 μm处的2.22%。任意两幅图像之间的最大点间差异，OMEGA为3.59%，CRISM为5.01%，同样与每个波段的不确定度相当。这些结果表明，尽管三幅HS-H图像具有不同的距离和观测几何，辐射校正因子仍保持稳定；与归一化情形相比，离散程度的增大反映了绝对通量对不同照明几何的敏感性。

所用独立表面区域和 OMEGA 观测的数量众多（来自 26 条火星快车号独立轨道的 21 个区域和 47 个区域—轨道对），涵盖了多种地表类型和照明条件，进一步增强了交叉定标结果的可靠性。图像间标准差较低，加上第4.2节所述均值与中位数校正因子的一致性，表明

导出校正因子不受单次观测或表面区域选择的影响，具有稳健性。独立定标仪器之间存在绝对辐射偏移，这是行星遥感中众所周知的现象：OSIRIS-REx 任务中，MapCam 与 OVIRS 之间发现了 17–18% 的偏移 [11], ，ONC-T 与 MapCam 之间的偏移则高达 15% [30],，两者均归因于辐射定标流程的差异。此处发现的 HS-H 相对于 OMEGA 的偏移（ $\sim$8%）与这一仪器间变异水平一致。HS-H 与 CRISM 之间的高度一致（$<$1%）则符合在轨定标期间利用 CRISM 观测确定 HS-H 相对增益因子的做法[24]。

5.2. 观测几何分析

辐射校正因子在不同表面区域和观测之间呈现显著离散。图 8 展示了质量筛选后保留的表面区域的辐射校正因子，并分别列出三幅 HS-H 图像（04、05 和 06）以及两种参考仪器（左侧为 OMEGA，右侧为 CRISM）的结果。对于每个区域，图中所示的校正因子是该区域所有可用 OMEGA观测的中位数，误差条表示不同观测之间的标准差。每个数据点的颜色表示该区域的 HS-H 通量中位数，即该图像所有可用观测中所有光谱波段的中位数——从最暗区域的深紫色到最亮区域的黄色。圆圈表示与 OMEGA 的比较，三角形表示与 CRISM 的比较。图中显示，所选区域之间的校正因子变化显著：OMEGA 的数值约为 0.78 至 1.03，CRISM 的数值约为 0.90 至 1.15。这种离散程度远大于第 5.1 节讨论的图像间标准差，表明区域间的变异不能仅归因于仪器噪声。

对 HS-H 数据应用的光度校正采用朗伯模型，即除以局部入射角的余弦值。已知火星表面的行为偏离朗伯行为，米纳尔特指数 k 从最暗区域的约 0.55 到最亮区域的 0.95 不等 [7, 18], ，这可能是观测到的离散度的成因之一。这两台参考仪器之间的相互偏差约为

7.3%；在整个光谱范围内，OMEGA 测得的辐射通量系统性地高于 CRISM（CRISM/OMEGA 比值 $= 0.927 \pm 0.010$适用于波段 4–22）。这一偏差与两台仪器绝对辐射定标的差异一致；两者采用不同程序和定标目标 [2, 19]独立完成定标。HS-H 与 CRISM 的高度一致，与 Prodan 等人所述的在轨定标程序 [24], 相符：该程序利用 CRISM 观测确定 HS-H 各光谱通道的相对增益因子，而绝对灵敏度则通过恒星观测独立测定。因此，HS-H 与 OMEGA 之间的偏差可能反映了导致 OMEGA 与 CRISM 相互偏差的同一组定标差异。文献中也曾报告其他行星任务仪器存在幅度相近的偏差。Golish 等人 [11]和 Yumoto 等人 [30] 发现，独立定标的仪器之间偏差最高可达 15–18%，这证实了在行星遥感中，这种程度的仪器间变异是意料之中的。

5.3. 前两个 *HS-H* 波段的特性

根据归一化光谱得出的校正因子显示，前两个波段与光谱其余部分的表现截然不同。对于波段 3–25（0.688–0.952 μm），即 OMEGA 的波段 3–22 和 CRISM 的波段 4–25，所有相对校正因子都接近 1；在 OMEGA 和 CRISM 两组比较中，标准差均低于 1%。这表明，在仪器整个工作波长范围内，HS-H 的相对光谱响应与参考仪器的相对光谱响应吻合良好，并且 HS-H 滤光片传递函数能够正确描述仪器在轨光谱形状。相比之下，波段 1 和 2（0.661 和 0.670 μm）的数值始终低于 1；与 OMEGA 比较时，数值分别为 $C^i = 0.9527 \pm 0.0072$ 和 $C^i = 0.9639 \pm 0.0075$。这些数值表明，在最短波长处，HS-H 的测量值比 OMEGA 低约 4.7% 和 3.6%。这一偏差在后续波段中并不存在，因此必定与仅影响两个最短波段的仪器效应有关。因此，计算辐射校正因子中位数时排除了波段 1 和 2；建议在未来对 HS-H 光谱开展科学分析时，对这两个波段进行仔细评估。

据推测，这一偏差是由 HS-H 滤光片传递函数发生波长漂移所致，而漂移源于地面校准与在轨工作条件之间的温度差。HS-H 仪器使用法布里-珀罗滤光片进行光谱分离，其响应在不同波长处呈现多个峰值。仪器还配备了宽带阻挡滤光片，以抑制不需要的高阶峰，仅允许每个波段的主峰通过。对于波段 1 和 2，主峰接近宽带阻挡滤光片的边缘，因此这些波段对法布里-珀罗板间距的任何变化都特别敏感。在低于地面校准时所用温度的条件下，板间距会减小，导致透射波长向较短波长偏移。这一偏移使波段 1 和 2 的主峰更加接近宽带滤光片的阻带区域，大幅降低这两个波段的总透射率，并造成校正因子中观察到的信号亏损（图 9）。

为量化这一影响，我们将 HS-H传递函数应用于本研究分析的相同表面区域的 OMEGA光谱：首先使用标称传递函数，然后使用经过不同幅度偏移的传递函数，直到与观测到的HS-H光谱达到最佳吻合。最佳吻合对应的偏移量为 -6 nm，这与地面校准（在室温下进行）和火星飞掠期间的飞行中工作条件（约为 -12℃）之间预期的温度差一致；从物理上看，这种温度差可以解释观测到的偏移。如图10所示，使用偏移 -6nm后的传递函数转换得到的 OMEGA光谱（红线），比使用标称传递函数转换得到的光谱（蓝线）更符合观测到的HS-H光谱（黑线），尤其是在波段1和2上。对于波段3–25，两种传递函数之间的差异可忽略不计，且处于不确定度范围内，这证实漂移仅限于最短波长，不影响光谱的其余部分。波段4是CRISM覆盖的第一个波段，其数值略高于1（$C^{i} = 1.0144 \pm 0.0072$），这并非由影响波段1和2的漂移所致。该波段位于0.638至0.690 μm之间的CRISM光谱间隙边缘；如第4.2节所述，HS-H传递函数在此处部分通过外推进行评估。

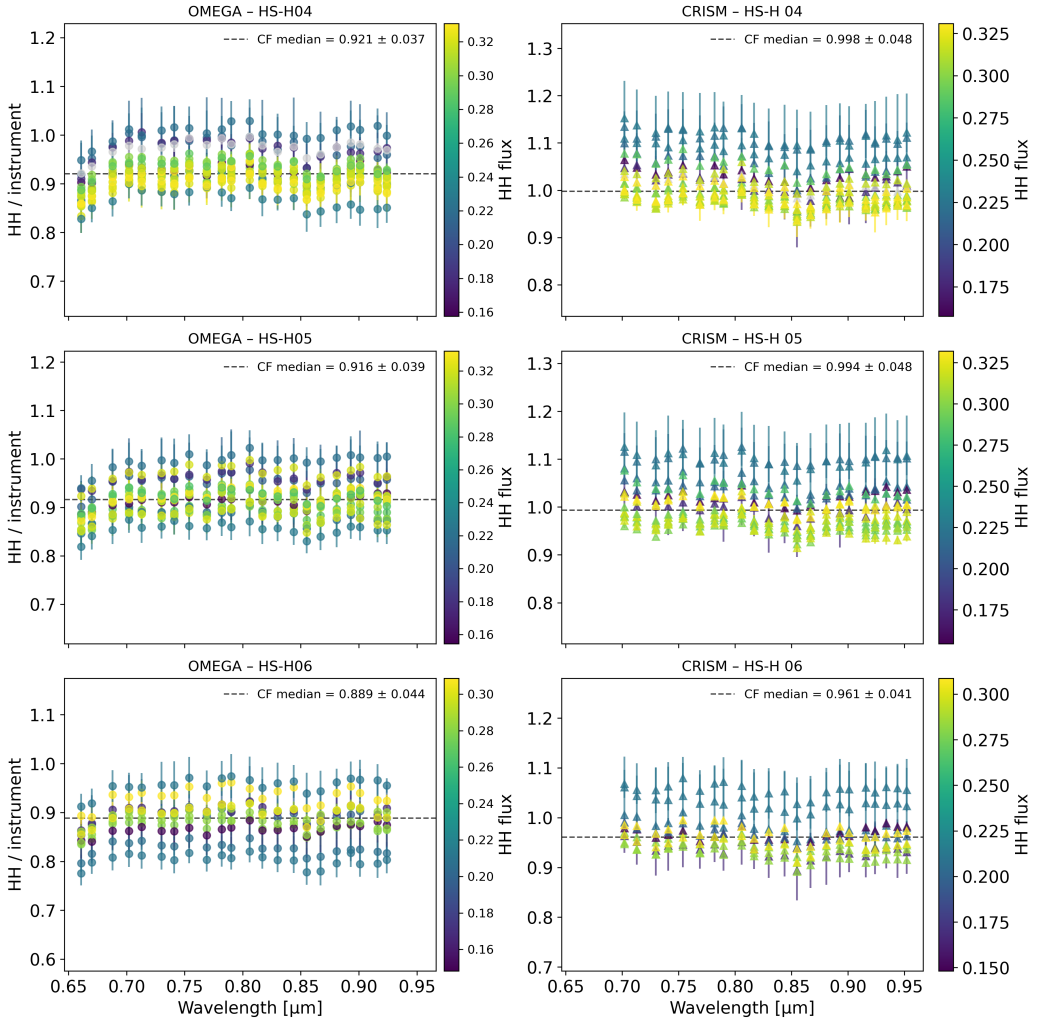


图 8：质量筛选后保留的所有表面区域的辐射校正因子 C^{i}_{abs}，显示为三个 HS-H图像（从上到下各行分别为图像 04、05 和 06）中每个图像以及两台参考仪器（左列为 OMEGA，右列为 CRISM）对应的波长函数。每个圆形符号（OMEGA）或三角形符号（CRISM）代表一个表面区域的校正因子中位数，该数值根据给定 HS-H图像中该区域的所有可用观测计算得出。误差条表示同一区域不同观测之间校正因子的标准差。每个符号的颜色表示相应表面区域的 HS-H 通量中位数，并将其作为表面反照率的代理值：从代表最暗区域的深紫色到代表最亮区域的黄色。所选区域的校正因子涵盖了较宽的数值范围，反映了表面反照率和观测几何对 HS-H 与参考仪器之间绝对辐射比较的综合影响。

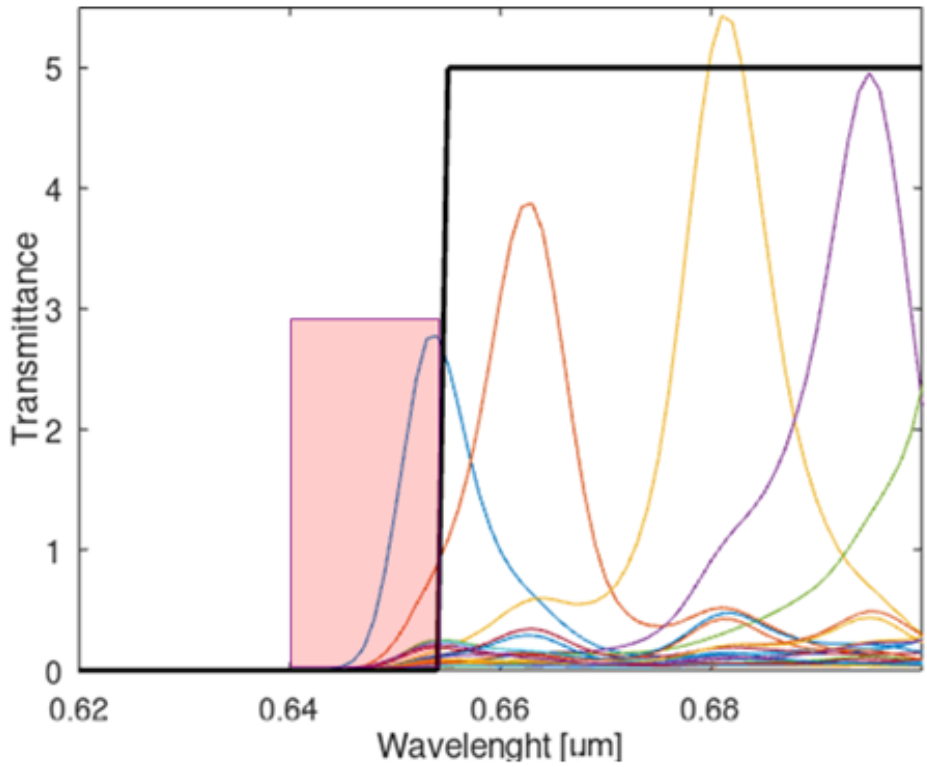


图 9：波长漂移效应对 HS-H 滤光片传递函数的影响示意图。右图展示了两个最短波段（0.661 和 0.670 μm）的局部放大图，其中主峰接近宽带滤光片的阻带区域（红色阴影区域）。在飞行中工作温度下，法布里-珀罗板间距减小，导致传递函数向较短波长方向移动（蓝色箭头），从而部分覆盖阻带区域，并降低这些波段的总透射率。

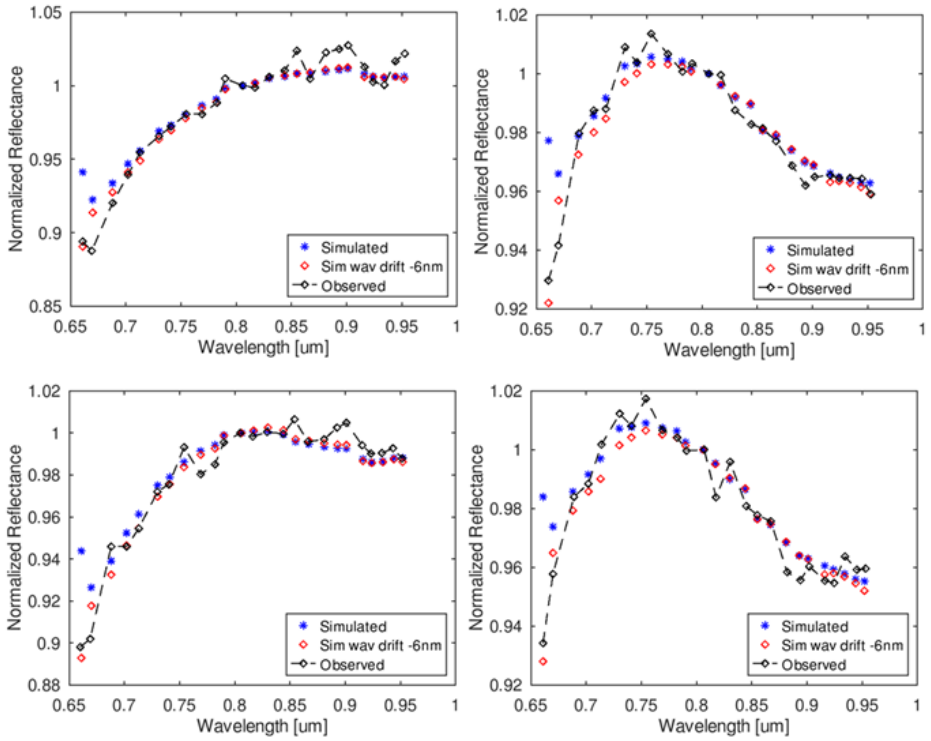


图10：四个代表性表面区域的归一化光谱比较。蓝色数据点：使用标称 HS-H 传递函数转换后的 OMEGA 光谱。红色菱形：使用向短波长方向偏移–6nm的 HS-H 传递函数转换后的 OMEGA 光谱。黑色菱形：相同区域观测到的 HS-H 光谱。偏移 -6 nm后，最短的两个波长波段与观测到的 HS-H 光谱吻合显著改善，而第 3–25 波段的差异可以忽略，且处于测量不确定性范围内。请注意，所有数据点均采用标准（标称）中心波长绘制。

6. 结论

我们利用赫拉航天器于2025年3月12日火星飞掠期间获取的数据，对欧洲航天局赫拉航天器搭载的高光谱成像仪 HyperScout-H 进行了全面的交叉定标。HS-H 的在轨辐射定标循序渐进：在 ESTEC 开展的地面定标 [23]确立了实验室条件下的仪器响应基准；在轨定标 [24] 利用恒星观测以及与五个火星表面区域的 CRISM 数据进行初步比较，进一步完善了灵敏度系数和几何畸变校正，并首次估算了仪器性能。在此基础上，本研究开展了交叉定标，将分析范围扩展至 21 个表面区域，这些区域由来自 26 个火星快车号唯一轨道的 47 个区域—轨道对采样，并将 HS-H 同时与 OMEGA 和 CRISM 进行了比较。

本研究的主要结果总结如下：

- 根据归一化光谱得出的波长相关校正因子在波段 3–25（0.688–0.952 μm）接近 1；与 OMEGA 和 CRISM 的比较中，标准差均低于 1%，证实在工作波长范围内，HS-H 的相对光谱响应与两种参考仪器均高度吻合。波段 1 和 2（0.661 和 0.670 μm）则分别呈现 4.7% 和 3.6% 的系统性偏低，这可能归因于法布里-珀罗滤光片传递函数发生热致波长漂移，与地面校准和飞行中工作条件之间的温度差异相符 [23]。

- 辐射校正因子表明，HS-H 测得的辐射通量比 OMEGA 低约 8%，同时与 CRISM 保持了非常好的一致性（偏差为 $<$1%）。在第 3 至第 25 波段内，这两种偏差实际上与波长无关，表明辐射差异是乘性的，并不会使光谱形状发生畸变。OMEGA 与 CRISM 之间的相互偏差（ $\sim$7.3%）可能反映了两者独立绝对辐射定标之间的差异、光度校正流程的差异，或残余的几何效应——仅凭当前数据无法明确确定其来源。

• 交叉定标显示出极佳的重复性和可靠性。相对校正因子表明，在从距离火星 14521 至 20924 km 处获取的三幅图像中，尽管观测几何存在显著差异，HS-H/OMEGA 和 HS-H/CRISM 的图像间平均标准差分别为 0.22% 和 0.20%；而绝对通量校正因子分别为 1.37% 和 1.70%。这些数值证实，HS-H 是一种稳定且可靠的仪器，其辐射响应不会显著依赖于距离或飞越几何条件。

• Prodan 等人 [24] 推导的几何畸变校正成功应用于 HS-H 火星图像，使科学数据能够与参考仪器数据集准确配准，这证实了行星表面观测在轨几何校准的有效性。

• 应用于 HS-H 数据的光度校正采用朗伯模型，即除以局部入射角的余弦值。已知火星表面的行为偏离朗伯特性 [7, 18], ，这可能是观测到绝对校正因子离散度的原因之一。

本研究提出的校正因子存在一些局限。三幅 HS-H 图像是在同一次观测期间获取的，因此无法评估长期稳定性。HS-H 观测与 OMEGA 和 CRISM 的观测并非同时进行，季节性或长期表面变化可能会导致观测到的离散度。对 HS-H 数据应用的光度校正采用朗伯模型，即除以局部入射角的余弦值。由于缺乏针对所分析区域专门校准的光度模型，因此无法对绝对通量偏移的几何依赖性进行定量校正。在完整的光谱和空间分辨率下，每个宏像元的 25 个光谱采样点均由单次曝光中的一个子像元提供，对应的每个光谱采样点信噪比约为 20 至 33。本研究提出的校正因子是根据 90 至 105 个宏像元的平均值推导得出的，因此将其应用于单个宏像元光谱时，可能需要进行空间或光谱分箱，以达到相当的信噪比。

本研究推导的波长相关校正因子——包括归一化校正因子（表3）和绝对通量校正因子（表4）——可直接应用于未来在双星小行星迪迪莫斯—迪莫弗斯系统近距离操作期间开展的 HS-H 科学观测，为该双小行星系统的成分和光谱表征提供所需的辐射测量基础。

致谢

作者感谢*ESA/Hera*飞行控制与飞行动力学团队成功落实了所有拟议要求。*A.F.*感谢帕多瓦大学通过博士奖学金提供支持。*A.F.*、*M.L.*和*F.L.F.*感谢意大利航天局（*ASI*）通过协议编号*2022-8-HH.0*为*ESA*的赫拉任务提供资金支持。*MP*、*JdL*和*GPP*感谢*ESA*合同*RFQ/3-18365/23/NL/GLC/my*对招标项目*3-18365“Hera*调查团队仪器运行与数据分析准备”的资金支持。*MP*感谢*ESA/PRODEX*实验协议编号*4000151670“*用于太阳系小天体探测的高光谱观测去马赛克处理”提供的资金支持。*MP*感谢空间科学研究所——*INFLPR*分部（罗马尼亚）提供的计算资源和基础设施，以及*Adrian Sevcenco*博士和*Ionel Stan*博士提供的技术支持。我们感谢两位审稿人认真且富有建设性的评审意见，这些意见提升了本文的质量。

利益冲突声明

作者声明，他们不存在已知的竞争性经济利益或个人关系，且这些利益或关系可能会被认为影响了本文所报告的工作。

写作过程中使用生成式人工智能及人工智能辅助技术的声明

在本研究的准备过程中，作者使用 Claude（Anthropic）进行语言与可读性修订。使用该工具/服务后，作者根据需要审阅并编辑了内容，并对已发表文章的内容承担全部责任。

数据可用性

本研究使用的 OMEGA 和 CRISM 数据分别可通过 ESA 行星科学档案馆（https://psa.esa.int/psa/）和 PDS地球科学节点（https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mro/crism. htm）公开获取。HS-H 数据属于赫拉任务档案，受欧洲航天局赫拉数据政策约束；如需获取，可联系通讯作者提出申请。本研究使用的提取光谱和导出校正因子可向通讯作者索取。

参考文献

[1] Bibring, J.P., Langevin, Y., Gendrin, A., Gondet, B., Poulet, F., Berthé, M., Soufflot, A., Arvidson, R., Mangold, N., Mustard, J., Drossart, P., OMEGA团队, Erard, S., Forni, O., Combes, M., Encrenaz, T., Fouchet, T., Mer- chiorri, R., Belluci, G., Altieri, F., Formisano, V., Bonello, G., Capaccioni, F., Cerroni, P., Coradini, A., Fonti, S., Kottsov, V., Ignatiev, N., Moroz, V., Titov, D., Zasova, L., Mangold, M., Pinet, P., Douté, S., Schmitt, B., Sotin, C., Hauber, E., Hoffmann, H., Jaumann, R., Keller, U., Duxbury, T., Forget, F., 2005年. OMEGA/Mars Express观测揭示的火星表面多样性。《科学》307, 1576–1581. doi:10.1126/science.1108806.[2] Bibring, J.P., Soufflot, A., Berthé, M., Langevin, Y., Gondet, B., Drossart, P., Bouyé, M., Combes, M., Puget, P., Semery, A., Bellucci, G., Formisano, V., Moroz, V., Kottsov, V., Bonello, G., Erard, S., Forni, O., Gendrin, A., Manaud, N., Poulet, F., Poulleau, G., Encrenaz, T., Fouchet, T., Melchiori, R., Altieri, F., Ignatiev, N., Titov, D., Zasova, L., Coradini, A., Capacionni, F., Cerroni, P., Fonti, S., Mangold, N., Pinet, P., Schmitt, B., Sotin, C., Hauber, E., Hoffmann, H., Jaumann, R., Keller, U., Arvidson, R., Mustard, J., Forget, F., 2004. OMEGA：矿物学、水、冰与活动观测仪，载于：Wilson, A., Chicarro, A.（编），火星快车号：科学载荷，页37–49。

[3] Chabot, N.L., Rivkin, A.S., Cheng, A.F., Barnouin, O.S., Fahnestock, E.G., Richardson, D.C., Stickle, A.M., Thomas, C.A., Ernst, C.M., Terik Daly, R., Dotto, E., Zinzi, A., Chesley, S.R., Moskovitz, N.A., Barbee, B.W., Abell, P., Agrusa, H.F., Bannister, M.T., Beccarelli, J., Bekker, D.L., Bruck Syal, M., Buratti, B.J., Busch, M.W., Campo Bagatin, A., Chatelain, J.P., Chocron, S., Collins, G.S., Conversi, L., Davison, T.M., DeCoster, M.E., Prasanna Deshapriya, J.D., Eggl, S., Espiritu, R.C., Farnham, T.L., Ferrais, M., Ferrari, F., Föhring, D., Fuentes-Muñoz, O., Gai, I., Giordano, C., Glenar, D.A., Gomez,

E., Graninger, D.M., Green, S.F., Greenstreet, S., Hasselmann, P.H., Herreros, I., Hirabayashi, M., Husárik, M., Ieva, S., Ivanovski, S.L., Jackson, S.L., Jehin, E., Jutzi, M., Karatekin, O., Knight, M.M., Kolokolova, L., Kumamoto, K.M., Küppers, M., La Forgia, F., Lazzarin, M., Li, J.Y., Lister, T.A., Lolachi, R., Lucas, M.P., Lucchetti, A., Luther, R., Makadia, R., Mazzotta Epifani, E., McMahon, J., Merisio, G., Merrill, C.C., Meyer, A.J., Michel, P., Micheli, M., Migliorini, A., Minker, K., Modenini, D., Moreno, F., Murdoch, N., Murphy, B., Naidu, S.P., Nair, H., Nakano, R., Opitom, C., Ormö, J., Michael Owen, J., Pajola, M., Palmer, E.E., Palumbo, P., Panicucci, P., Parro, L.M., Pearl, J.M., Penttilä, A., Perna, D., Petrescu, E., Pravec, P., Raducan, S.D., Ramesh, K.T., Ridden-Harper, R., Rizos, J.L., Rossi, A., Roth, N.X., Rożek, A., Rozi- tis, B., Ryan, E.V., Ryan, W.H., Sánchez, P., Santana-Ros, T., Scheeres, D.J., Scheirich, P., Senel, C.B., Snodgrass, C., Soldini, S., Souami, D., Statler, T.S., Street, R., Stubbs, T.J., Sunshine, J.M., Tan, N.J., Tancredi, G., Tinsman, C.L., Tortora, P., Tusberti, F., Walker, J.D., Waller, C.D., Wünnemann, K., Zannoni, M., Zhang, Y., 2024. 双小行星重定向测试（DART）任务行星防御研究的成果。《行星科学杂志》5, 49. doi:10.3847/PSJ/ad16e6.

[4] Daly, R.T., Ernst, C.M., Barnouin, O.S., Chabot, N.L., Rivkin, A.S., Cheng, A.F., Adams, E.Y., Agrusa, H.F., Abel, E.D., Alford, A.L., Asphaug, E.I., Atchison, J.A., Badger, A.R., Baki, P., Ballouz, R.L., Bekker, D.L., Bellerose, J., Bhaskaran, S., Buratti, B.J., Cambioni, S., Chen, M.H., Chesley, S.R., Chiu, G., Collins, G.S., Cox, M.W., DeCoster, M.E., Ericksen, P.S., Espiritu, R.C., Faber, A.S., Farnham, T.L., Ferrari, F., Fletcher, Z.J., Gaskell, R.W., Graninger, D.M., Haque, M.A., Harrington-Duff, P.A., Hefter, S., Herreros, I., Hirabayashi, M., Huang, P.M., Hsieh, S.Y.W., Jacobson, S.A., Jenkins, S.N., Jensenius, M.A., John, J.W., Jutzi, M., Kohout, T., Krueger, T.O., Laipert, F.E., Lopez, N.R., Luther, R., Lucchetti, A., Mages, D.M., Marchi, S., Mar- tin, A.C., McQuaide, M.E., Michel, P., Moskovitz, N.A., Murphy, I.W., Mur- doch, N., Naidu, S.P., Nair, H., Nolan, M.C., Ormö, J., Pajola, M., Palmer, E.E., Peachey, J.M., Pravec, P., Raducan, S.D., Ramesh, K.T., Ramirez, J.R., Reynolds, E.L., Richman, J.E., Robin, C.Q., Rodriguez, L. M., Rouf- berg, L.M., Rush, B.P., Sawyer, C.A., Scheeres, D.J., Scheirich, P., Schwartz, S.R., Shannon, M.P., Shapiro, B.N., Shearer, C.E., Smith, E.J., Steele, R.J., Steckloff, J.K., Stickle, A.M., Sunshine, J.M., Superfin, E.A., Tarzi, Z.B., Thomas, C.A., Thomas, J.R., Trigo-Rodríguez, J.M., Tropf, B.T., Vaughan, A.T., Velez, D., Waller, C.D., Wilson, D.S., Wortman, K.A., Zhang, Y., 2023。为行星防御而对一颗小行星实施动能撞击并取得成功。《自然》616，443–447。doi:10.1038/s41586-023-05810-5，arXiv:2303.02248。

[5] de León, J., Licandro, J., Duffard, R., Serra-Ricart, M., 2006年。11颗富含橄榄石和辉石的近地小行星的光谱分析与矿物学表征。《太空研究进展》37，178–183。doi:10.1016/j.asr.2005.05.074.[6] Dunn, T.L., Burbine, T.H., Bottke, W.F., Clark, J.P., 2013。近地小行星的矿物组成与来源区域。《伊卡洛斯》222，273–282。doi:10.1016/j. icarus.2012.11.007.[7] Erard, S., 2001。一种火星近红外光谱光度模型。《地球物理研究快报》28，1291–1294。doi:10.1029/2000GL012347.[8] Esposito, M., Marchi, A.Z., 2015。Hyper-cube：智能高光谱成像仪，载于：2015年 IEEE 航空航天计量会议（MetroAeroSpace），第547–550页。doi:10.1109/MetroAeroSpace.2015.7180716.[9] Esposito, M., Zuccaro Marchi, A., 2019。首台纳米卫星高光谱成像仪的在轨演示，载于：Sodnik, Z., Karafolas, N., Cugny, B.（编），国际空间光学会议——ICSO 2018，第1118020页。doi:10.1117/12.2535991.[10] 欧洲航天局，2024。赫拉任务运行SPICE内核数据集。doi:10.57780/esa-k25x2cv.[11] Golish, D.R., Simon, A.A., Reuter, D.C., Ferrone, S., Clark, B.E., Li, J.Y., DellaGiustina, D.N., Drouet d'Aubigny, C., Rizk, B., Lauretta, D.S., 2022。OSIRIS-REx任务中MapCam与OVIRS的跨仪器比较。《空间科学评论》218，5。doi:10.1007/s11214-022-00873-8.[12] Lazzarin, M., La Forgia, F., Farina, A., Migliorini, A., Frattin, E., Ochner, P., Michel, P., Kueppers, M., de Leon, J., Carnelli, I., Ulamec, S., Chabot, N., Ammannito, E., Amoroso, M., Geier, S., Hirabayashi, M., Kareta, T., Li, J.Y., Mura, A.C., Oszkiewicz, D., Popescu, M., Rivkin, A.S., 2026年。双小行星重定向测试（DART）任务撞击后对近地迪迪莫斯-迪莫弗斯双小行星系统的光谱学研究。《自然通讯》17，551。doi:10.1038/s41467-025-67242-1.[13]McGuire, P.C., Bishop, J.L., Brown, A.J., Fraeman, A.A., Marzo, G.A., Frank Morgan, M., Murchie, S.L., Mustard, J.F., Parente, M., Pelkey, S.M., Roush, T.L., Seelos, F.P., Smith, M.D., Wendt, L., Wolff, M.J., 2009。改进用于CRISM和OMEGA光谱数据大气校正的火山扫描算法。《行星与空间科学》57，809–815。doi:10.1016/j.pss.2009.03.007，arXiv:0903.3672。

[14] Michel, P., Kueppers, M., Sierks, H., Carnelli, I., Cheng, A.F., Mellab, K., Granvik, M., Kestilä, A., Kohout, T., Muinonen, K., Näsilä, A., Penttila, A., Tikka, T., Tortora, P., Ciarletti, V., Hérique, A., Murdoch, N., Asphaug, E., Rivkin, A., Barnouin, O., Campo Bagatin, A., Pravec, P., Richardson, D.C., Schwartz, S.R., Tsiganis, K., Ulamec, S., Karatekin, O., 2018年。前往双小行星的AIDA任务的欧洲部分：DART任务撞击的表征与解读。《太空研究进展》62，2261–2272。doi:10.1016/j.asr.2017.12.020。

[15] Michel, P., Küppers, M., Campo Bagatin, A., Carry, B., Charnoz, S., de Leon, J., Fitzsimmons, A., Gordo, P., Green, S.F., Hérique, A., Juzi, M., Karatekin, Ö., Kohout, T., Lazzarin, M., Murdoch, N., Okada, T., Palomba, E., Pravec, P., Snodgrass, C., Tortora, P., Tsiganis, K., Ulamec, S., Vincent, J.B., Wünnemann, K., Zhang, Y., Raducan, S.D., Dotto, E., Chabot, N., Cheng, A.F., Rivkin, A., Barnouin, O., Ernst, C., Stickle, A., Richardson, D.C., Thomas, C., Arakawa, M., Miyamoto, H., Nakamura, A., Sugita, S., Yoshikawa, M., Abell, P., Asphaug, E., Ballouz, R.L., Bottke, W.F., Lauretta, D.S., Walsh, K.J., Martino, P., Carnelli, I., 2022年。欧洲航天局Hera任务：详细表征DART撞击结果及双小行星（65803）双子星。《行星科学杂志》3，160。doi:10.3847/ PSJ/ac6f52。[16] Michel, P., Küppers, M., Fitzsimmons, A., Green, S., Lazzarin, M., Ulamec, S., Abell, P., Sugita, S., Campo Bagatin, A., Carry, B., Charnoz, S., de León, J., Ferrari, F., Hérique, A., Jutzi, M., Karatekin, Ö., Kohout, T., Murdoch, N., Okada, T., Palomba, E., Pravec, P., Raducan, S., Snodgrass, C., Tortora, P., Vincent, J.B., Wünnemann, K., 2025年。赫拉空间任务：过去、现在和未来的近地小行星探测任务背景下的赫拉空间任务。《空间科学评论》221，70。doi:10.1007/s11214-025-01195-1。[17] Montabone, L., Forget, F., Millour, E., Wilson, R.J., Lewis, S.R., Cantor, B., Kass, D., Kleinböhl, A., Lemmon, M.T., Smith, M.D., Wolff, M.J., 2015年。火星尘埃光学深度的八年气候学。《伊卡洛斯》251，65–95。doi:10.1016/j.icarus.2014.12.034。[18] Munaretto, G., Pajola, M., Lucchetti, A., Re, C., Cremonese, G., Simioni, E., Cambianica, P., Thomas, N., 2021年。高分辨率成像科学实验和彩色与立体表面成像系统图像的地形校正：火星反照率特征彩色观测的验证与应用。《行星与空间科学》200，105198。doi:10.1016/j. pss.2021.105198。

[19] Murchie, S., Arvidson, R., Bedini, P., Beisser, K., Bibring, J.P., Bishop, J., Boldt, J., Cavender, P., Choo, T., Clancy, R.T., Darlington, E.H., Des Marais, D., Espiritu, R., Fort, D., Green, R., Guinness, E., Hayes, J., Hash, C., Heffernan, K., Hemmler, J., Heyler, G., Humm, D., Hutcheson, J., Izenberg, N., Lee, R., Lees, J., Lohr, D., Malaret, E., Martin, T., McGovern, J.A., McGuire, P., Morris, R., Mustard, J., Pelkey, S., Rhodes, E., Robinson, M., Roush, T., Schaefer, E., Seagrave, G., Seelos, F., Silverglate, P., Slavney, S., Smith, M., Shyong, W.J., Strohbehn, K., Taylor, H., Thompson, P., Tossman, B., Wirzburger, M., Wolff, M., 2007年。火星勘测轨道飞行器上的火星紧凑型侦察成像光谱仪（CRISM）。《地球物理研究杂志（行星）》112，E05S03。doi:10.1029/2006JE002682。[20] Mustard, J.F., Poulet, F., Head, J.W., Mangold, N., Bibring, J.P., Pelkey, S.M., Fassett, C.I., Langevin, Y., Neukum, G., 2007年。利用OMEGA/Mars Express数据研究尼利槽沟区域的矿物学：1. 伊希迪斯盆地的古老撞击熔融物及其对从诺亚纪向赫斯珀里亚纪过渡的意义。《地球物理研究杂志（行星）》112，E08S03。doi:10.1029/2006JE002834。[21] Naidu, S.P., Chesley, S.R., Moskovitz, N., Thomas, C., Meyer, A.J., Pravec, P., Scheirich, P., Farnocchia, D., Scheeres, D.J., Brozovic, M., Benner, L.A.M., Rivkin, A.S., Chabot, N.L., 2024年。DART撞击后小行星Dimorphos的轨道与物理特征表征。《行星科学杂志》5，74。doi:10.3847/PSJ/ad26e7。[22] Polishook, D., DeMeo, F.E., Burt, B.J., Thomas, C.A., Rivkin, A.S., Sanchez, J.A., Reddy, V., 2023。Didymos系统的近红外光谱观测：DART撞击前后的每日变化表明Dimorphos起源于Didymos。《行星科学杂志》4，229。doi:10.3847/ PSJ/ad08ae，arXiv:2311.00421。[23] Popescu, M.M., de León, J., Prodan, G.P., Küppers, M., Kovács, G., Nagy, B.V., Grieger, B., Goldberg, H., Esposito, M., Vercruyssen, N., Tatsumi, E., Krämer Ruggiu, L., Karatekin, Ö., Sugita, S., Lazzarin, M., Abell, P.A., Vincent, J.B., Petrisor, I., Michel, P., 2025年。HyperScout-H：欧洲航天局赫拉任务的高光谱成像仪。《空间科学评论》221，112。doi:10.1007/s11214-025-01237-8，arXiv:2511.08047。[24] Prodan, G.P., Popescu, M., de León, J., Kovács, G., Küppers, M., Grieger, B., Guerbuez, C., Tatsumi, E., Licandro, J., López, A.E., Nagy, V., Farina, A., Dumitru, B.A., Poggiali, G., Vincent, J.B., Kohout, T., Petrisor, I., Palomba, E., Esposito, M., Vercruyssen, N., Sugita, S., Lazzarin, M., Abell, P., Michel,

P., 2026年。欧空局赫拉号的HyperScout-H成像仪在轨定标。《伊卡洛斯》454，117081。doi:10.1016/j.icarus.2026.117081。

[25] Rivkin, A.S., Chabot, N.L., Stickle, A.M., Thomas, C.A., Richardson, D.C., Barnouin, O., Fahnestock, E.G., Ernst, C.M., Cheng, A.F., Chesley, S., Naidu, S., Statler, T.S., Barbee, B., Agrusa, H., Moskovitz, N., Terik Daly, R., Pravec, P., Scheirich, P., Dotto, E., Della Corte, V., Michel, P., Küppers, M., Atchison, J., Hirabayashi, M., 2021年。双小行星重定向测试（DART）：行星防御研究与要求。《行星科学杂志》2，173。doi:10.3847/PSJ/ac063e。

[26] Sánchez-Lavega, A., del Río-Gaztelurrutia, T., Spiga, A., Hernández-Bernal, J., Larsen, E., Tirsch, D., Cardesin-Moinelo, A., Machado, P., 2024。通过火星快车号成像研究火星大气中的动力学现象。《空间科学评论》220，16。doi:10.1007/s11214-024-01047-4。[27] Scheirich, P., Pravec, P., Meyer, A.J., Agrusa, H.F., Richardson, D.C., Ches- ley, S.R., Naidu, S.P., Thomas, C., Moskovitz, N.A., 2024。基于互掩事件测光确定Dimorphos的轨道。《行星科学杂志》5，17。doi:10.3847/PSJ/ad12cf, arXiv:2403.02804。[28] Stcherbinine, A., Langevin, Y., Carter, J., Vincendon, M., Leseigneur, Y., Barraud, O., 2024。OMEGA-Py：用于OMEGA数据的Python工具。《开源软件杂志》9，6566。doi:10.21105/joss.06566。[29] Viviano-Beck, C.E., Seelos, F.P., Murchie, S.L., Kahn, E.G., Seelos, K.D., Taylor, H.W., Taylor, K., Ehlmann, B.L., Wisemann, S.M., Mustard, J.F., Morgan, M.F., 2014。基于当前探测到的火星矿物多样性修订CRISM光谱参数和汇总产品。《地球物理研究杂志（行星）》119，1403–1431。doi:10.1002/2014JE004627。[30] Yumoto, K., Tatsumi, E., Kouyama, T., Golish, D.R., Cho, Y., Morota, T., Kameda, S., Sato, H., Rizk, B., DellaGiustina, D.N., Yokota, Y., Suzuki, H., de León, J., Campins, H., Licandro, J., Popescu, M., Rizos, J.L., Honda, R., Yamada, M., Sakatani, N., Honda, C., Matsuoka, M., Hayakawa, M., Sawada, H., Ogawa, K., Yamamoto, Y., Lauretta, D.S., Sugita, S., 2024。小行星龙宫和贝努的光学光谱比较：I. 隼鸟2号/ONC-T与OSIRIS-REx/MapCam之间的交叉校准。《伊卡洛斯》417，116122。doi:10.1016/j.icarus.2024.116122，arXiv:2306.13321。

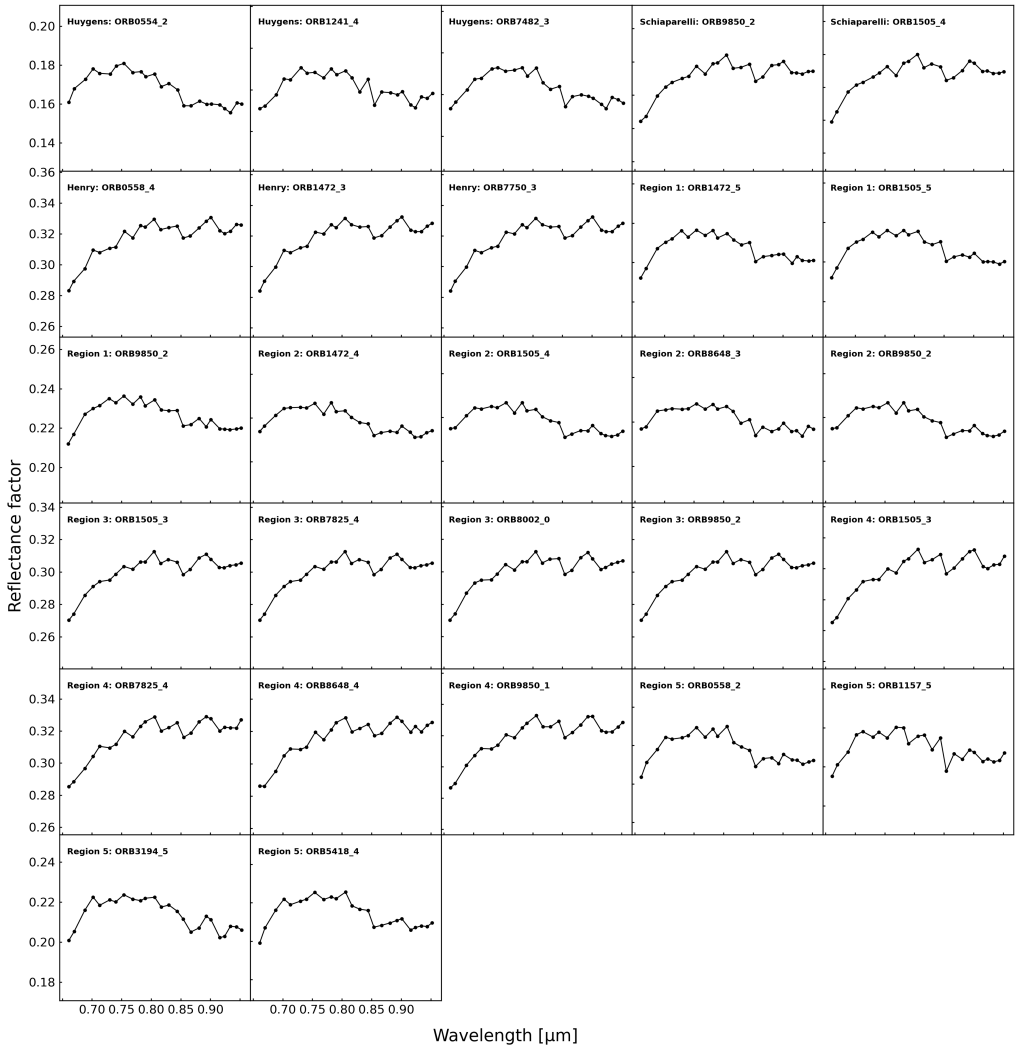
附录A. 补充材料

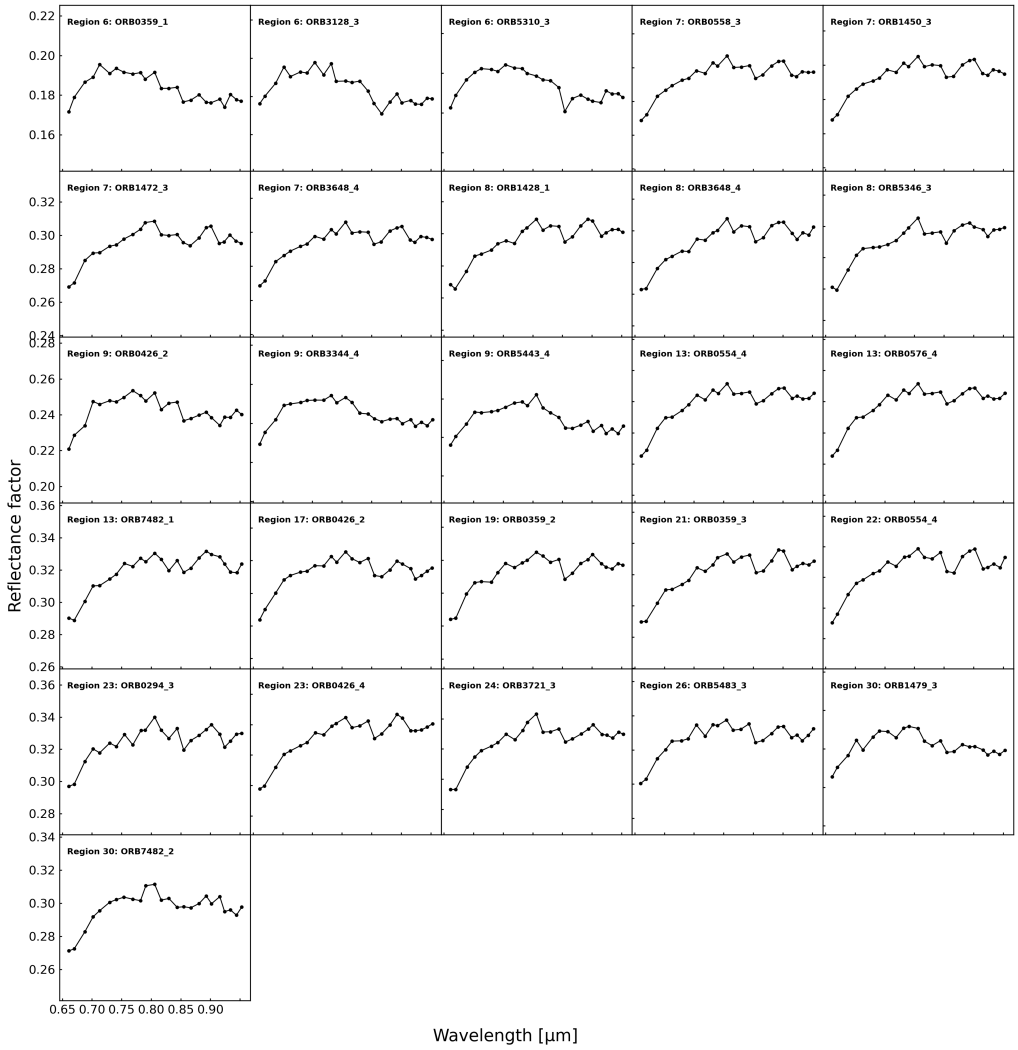
I and HS-H data used in
name; the OMEGA orbit
oundaries of the selected
gles of OMEGA over the
selected region (subscript
red in images HS-L0-FE-
spectively). Dashes (—)

$\bar{\alpha}_{HH5}$ (°)	$\bar{e}_{HH5}$ (°)	$\bar{i}_{HH5}$ (°)	$\bar{\alpha}_{HH6}$ (°)	$\bar{e}_{HH6}$ (°)	$\bar{i}_{HH6}$ (°)
25.7	26.6	45.2	34.6	23.3	46.3
25.7	25.5	44.5	34.6	22.2	45.6
30.7	22.8	25.2	41.0	28.5	25.5
30.4	19.9	24.6	40.9	26.3	24.4
33.0	25.2	10.2	—	—	—
33.0	24.9	10.2	—	—	—
33.0	24.9	10.2	—	—	—
26.3	23.9	42.2	35.7	21.2	42.0
26.3	23.7	41.9	35.8	21.0	41.8
26.3	23.9	41.9	35.8	21.3	41.8
29.0	16.3	29.9	39.2	20.3	29.7
29.0	16.7	29.9	39.2	20.6	29.6
29.1	16.4	29.5	39.3	20.5	29.3
29.0	16.7	29.9	39.2	20.6	29.6
31.7	22.7	18.9	—	—	—
31.7	22.7	18.9	—	—	—
31.8	23.0	19.0	—	—	—
31.7	22.7	18.9	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—

$\bar{\alpha}_{\mathrm{HH5}}$ (°)	$\bar{e}_{\mathrm{HH5}}$ (°)	$\bar{i}_{\mathrm{HH5}}$ (°)	$\bar{\alpha}_{\mathrm{HH6}}$ (°)	$\bar{e}_{\mathrm{HH6}}$ (°)	$\bar{i}_{\mathrm{HH6}}$ (°)
—	—	—	—	—	—
25.6	19.0	41.9	34.8	13.3	42.1
25.7	19.6	42.1	35.0	14.3	42.3
26.6	9.6	36.3	36.2	1.0	36.8
27.0	8.0	34.8	36.6	2.1	35.3
30.1	11.0	22.1	40.6	19.8	22.3
30.2	12.2	22.0	40.7	20.7	22.1
30.1	11.2	22.1	40.6	20.0	22.2
32.4	21.1	11.4	—	—	—
32.5	21.7	11.0	—	—	—
32.3	20.7	12.2	—	—	—
26.9	11.7	36.0	36.3	8.5	36.8
26.7	13.8	37.0	36.1	10.6	37.9
26.8	13.4	36.5	36.2	10.7	37.4
30.8	30.9	30.3	40.8	36.6	31.8
30.8	30.5	30.0	40.8	36.3	31.5
27.9	9.5	31.6	37.7	11.5	32.5
29.2	5.7	25.4	39.3	14.3	26.1
—	—	—	—	—	—
32.2	33.8	25.5	—	—	—
33.1	29.9	15.6	—	—	—
33.2	30.2	15.2	—	—	—
—	—	—	—	—	—
33.3	39.8	25.9	—	—	—
28.7	27.7	36.6	38.3	30.2	38.0
28.8	25.8	35.1	38.4	28.6	36.4

图 A.11：从用于分析的选定火星区域中提取的中位数 HS-H 光谱，数据来自图像 HS-L0-FE-025D-04-01。每个面板显示一个与特定区域和 OMEGA观测相关联的光谱。横轴表示波长，单位为微米；纵轴表示反射率因子。为清晰起见，每条光谱均使用独立的纵轴刻度。每个面板内标出了区域名称、对应的 OMEGA 轨道标识符，以及用于光谱提取的宏像素数量。图中仅显示质量筛选后保留的光谱，共 47 条。




Region 6: ORB0359_1
Region 6: ORB3128_3
Region 6: ORB5310_3
Region 7: ORB0558_3
Region 7: ORB1450_3
Region 7: ORB1472_3
Region 7: ORB3648_4
Region 8: ORB1428_1
Region 8: ORB3648_4
Region 8: ORB5346_3
Region 9: ORB0426_2
Region 9: ORB3344_4
Region 9: ORB5443_4
Region 13: ORB0554_4
Region 13: ORB0576_4
Region 13: ORB7482_1
Region 17: ORB0426_2
Region 19: ORB0359_2
Region 21: ORB0359_3
Region 22: ORB0554_4
Region 23: ORB0294_3
Region 23: ORB0426_4
Region 24: ORB3721_3
Region 26: ORB5483_3
Region 30: ORB1479_3
Region 30: ORB7482_2
Reflectance factor
0.65 0.70 0.75 0.80 0.85 0.90
Wavelength [µm]