



月亮

月亮是夜空中明亮而熟悉的景象，它显示出在不久的将来经过精心塑造的痕迹。

月球尘埃与太阳系年龄

创造论者援引 1960 年公布的地球每年 1430 万吨陨石尘埃输入量的数据，认为月球表面薄薄的尘埃层表明月球，进而地球和太阳系都很年轻。此外，他们还经常声称，在登月之前，人们非常担心宇航员会陷入非常厚的尘埃层中，但之后科学家们却对为何预期的尘埃层并未出现保持沉默。本文将结合大量相关文献，对这些论点及其反对者提出的反驳进行全面考察。

在用于测量陨石尘埃输入速率的各种技术中，化学分析（对深海沉积物和极地冰层中的尘埃进行分析）以及卫星探测器测量似乎是最可靠的。然而，仔细观察会发现，尘埃颗粒的尺寸范围很广，直径从几分之一微米、质量几分之一微克不等，最大可达毫米级和克

级，后者与陨石的尺寸和质量范围相当。因此，不同的测量技术涵盖了不同尺寸和质量范围的颗粒，要获得最可靠的估算值，需要整合不同技术在所有颗粒质量和尺寸范围内的测量结果。这样做之后，目前大多数对地球陨石尘埃输入速率的估算值在每年 10,000 至 20,000 吨之间，尽管也有人认为这一速率可能高达每年 100,000 吨。

除了卫星测量（需应用 2 倍聚焦因子以考虑地球和月球在大小和重力上的差异）之外，估算月球陨石尘埃输入量的两种主要技术是：月壤微量元素分析，以及测量和计数由微陨石撞击月球表面岩石表面形成的微陨石坑。这两种技术都依赖于均变论假设和年代测定方法。此外，微陨石坑数据和卫星数据之间存在一些尚未解释的严重差异，这表明目前的陨石尘埃输入量高于过去。然而，月球高地遍布陨石坑，这表明过去月球表面的陨石和陨石尘埃输入量更高。尽管如此，目前对月球表面陨石尘埃输入量的估计值约为每年 1 万吨。

在直接探测之前，科学家们对月球尘埃的厚度争论不休。一些人推测月球尘埃层非常厚，宇航员和飞船可能会“消失”其中，而大多数科学家则认为尘埃层很薄。随后，美国宇航局（NASA）发射火箭和卫星，并利用地面雷达测量陨石尘埃的流入量，结果表明月球

上的尘埃层很薄。1966 年中期，美国成功将五艘“勘测者”号探测器软着陆在月球表面。因此，在阿波罗号宇航员踏上月球三年前，NASA 就已经知道月球表面只有一层薄薄的尘埃层，宇航员和飞船都不会“消失”其中。阿波罗号宇航员的探测结果证实了这一点，他们只发现了几英寸厚的松散尘埃层。

阿波罗计划的探测揭示了月球表面松散尘埃下至少有几米厚的月壤。这种月壤由陨石撞击产生的月球岩石碎片与尘埃混合而成，其中一些尘埃本身也来自陨石。除了陨石和微陨石撞击之外，月球表面可能没有其他过程能够既产生更多尘埃又将其输送。因此，即使考虑到假定的早期强烈的陨石和陨石尘埃轰击，月壤和表面尘埃层中陨石尘埃和陨石碎片的含量似乎也并不与进化论者数十亿年的时间尺度相矛盾（尽管这并不能证明进化论者的观点）。遗憾的是，由于论点站不住脚或计算错误，神创论者迄今为止的反驳尝试均以失败告终。因此，在出现新的证据之前，神创论者不应继续利用月球上的尘埃来反驳月球和太阳系的古老历史。

介绍

创造论者二十多年来一直用来支持地球年轻的证据之一，是关于来自太空的陨石物质涌入以及所谓的“月球尘埃”问题的论点。该论点如下：

众所周知，宇宙尘埃颗粒以基本恒定的速率从太空进入地球大气层，然后逐渐沉降到地球表面。汉斯·彼得森对这种尘埃流入量进行了最精确的测量，他得出的数值为每年 1400 万吨。

¹这相当于 50 亿年间 积累了 14×10^{19} 磅。假设压实尘埃的密度为每立方英尺 140 磅，那么这相当于 10^{18} 立方英尺的体积。由于地球的表面积约为 5.5×10^{15} 平方英尺，这意味着在地球 50 亿年的历史中，全球范围内应该积累了一层厚约 182 英尺的陨石尘埃层！

当然，我们并没有在任何地方发现这种尘埃层的踪迹。月球表面的尘埃层厚度应该至少与地球表面一样厚，但宇航员也没有发现任何迹象（在登月之前，人们对此相当担忧）。人们曾认为宇航员抵达月球后会沉入尘埃之中，但官方似乎从未就为何没有出现预期的尘埃层做出任何解释。

即使地球只有 500 万年的历史，也应该积累超过 2 英寸厚的尘埃层。

为了避免有人认为侵蚀和混合过程可以解释 182 英尺厚的陨石尘埃层的缺失，需要指出的

是，这种物质的成分非常独特，尤其是镍和铁的含量。例如，镍在地壳中，尤其是在海洋中，是一种非常稀有的元素。彼得森估计陨石尘埃的平均镍含量为 2.5%，大约是地壳中镍含量的 300 倍。因此，如果所有陨石尘埃层都通过均匀混合分散到地壳中，那么所涉及的地壳厚度（假设地壳中原本完全没有镍）将是 182×300 英尺，也就是大约 10 英里

！地球地壳（直至地幔）平均厚度仅约 12 英里，这意味着地球地壳中几乎所有的镍都来源于地球假定年龄（ 5×10^9 年）内的陨石尘埃输入！²

这确实是一个强有力的论点，其力度之大甚至撼动了进化论阵营。因此，近来有人集中精力反驳这一证据。3-9 毕竟，**进化论**要想成为可信的理论，需要大量的时间（即数十亿年）才能发生，因为物种转变这一假定的过程显然不可能在单个观察者的有生之年内被观察到。所以，任何进化论者都不可能对地球和太阳系年龄不足 1 万年的证据感到满意。

但进化论者对这种论点有任何有效的批评吗？如果有，这些批评可以如何回应？

进化论者对这种论点的批评可以分为三类：

1. 陨石尘埃流入地球和月球的速率问题，
2. 问题是，当宇航员登陆月球时，NASA 是否真的预料到会发现月球上有一层厚厚的尘埃层。
3. 月球上实际发现的尘埃层代表了哪个时间段？

尘埃涌入地球

彼得森的估算

这场争议的核心人物是瑞典海洋研究所的汉斯·彼得森。1957 年，彼得森（当时担任夏威夷大学地球物理学教授）在夏威夷岛莫纳罗亚山顶附近海拔 11000 英尺（约 3350 米）处以及毛伊岛哈雷阿卡拉山海拔 10000 英尺（约 3050 米）处分别设置了集尘装置。他选择这两座山的原因是：

*“偶尔会有风从这些死火山的山坡上扬起熔岩尘埃，但通常情况下，空气几乎完全透明，几乎没有受到陆地尘埃的污染。”*¹⁰

彼得森利用他的集尘装置过滤一定量的空气，并分析其中的颗粒物。尽管他描述了所选采样点的空气污染并不严重，但彼得森非常清楚并担心他收集到的陨石（太空）尘埃仍然会被地球（大气）尘埃所掩盖，因为他说道：“然而，很明显，过滤器中收集到的尘埃主要来自地球。”¹¹ 因此，他采取了

分析尘埃样本中镍和钴含量的程序，因为他推断，与陨石中高含量的镍和钴相比，镍和钴在地球尘埃中都是稀有元素，因此，陨石尘埃中镍和钴的含量也相对较低。

根据对收集到的尘埃进行镍含量分析，彼得森最终估计每年约有 1400 万吨尘埃落到地球上。再次引用彼得森的话：

“大多数样本除了含有大量的铁之外，还含有少量但可测量的镍。30 个滤膜的平均镍含量为每 1000 立方米空气中含有 14.3 微克镍。这意味着每 1000 立方米空气中含有 0.6 毫克陨石尘埃。如果陨石尘埃的降落速度与 1883 年印尼喀拉喀托火山爆发产生的尘埃的降落速度相同，那么我的数据表明，每年降落到地球上的陨石尘埃总量为 1400 万吨。根据观测到的流星频率和其他数据，哈佛大学的沃森 (F. G. Watson) 计算出每年到达地球的陨石物质总重量在 36.5 万吨到 365 万吨之间。因此，他较高的估计值约为我基于夏威夷研究的估计值的四分之一。为了稳妥起见，尤其考虑到陨石尘埃降落到地球所需时间的不确定性，尘埃落定后，我认为每年五百万吨是合理的。”¹²

现在，一些进化论者抓住彼得森的保守观点，认为每年 500 万吨的数字更为合理，并以此为论据，宣称彼得森的估计“过高”¹³、“非常推测性”¹⁴和“尚待商榷”¹⁵。其中一位批评者甚至进一步指出，“彼得森收集的尘埃样本中混杂了大量大气尘埃，以至于他的估计**完全错误**”¹⁶（重点为笔者所加）。另一些人则表示，“彼得森的样本显然受到了远超他所估计的陆地尘埃的污染”¹⁷。那么，彼得森本人对他的每年 500 万吨的数字又作何解释呢？

“五百万吨的估算值也与深海沉积物的镍含量非常吻合。1950 年，我和巴黎的亨利·罗奇（Henri Rotschi）分析了瑞典探险队从太平洋采集的 77 个岩芯样本。这些样本的平均镍含量为 0.044%。任何样本中最高的镍含量为 0.07%。相比之下，大陆火成岩的平均镍含量为 0.008%，这清楚地表明陨石尘埃和球粒对镍的贡献相当大。

如果每年有五百万吨陨石尘埃落到地球上，其中 2.5% 是镍，那么每年每平方厘米海底新增的镍量将为 0.000000025 克，或占每年沉积的红土总量的 0.017%。这完全符合深海沉积物

0.044%的镍含量，因此五百万吨的估算值是合理的。”¹⁸

换句话说，作为一位声誉卓著的科学家，彼得森提出了自己的假设并警告了未知因素，他对自己的研究结果感到满意。

但是，当时了解彼得森及其工作的科学家又作何感想呢？例如，艾萨克·阿西莫夫博士的评论

¹⁹证实，当时的其他科学家也对彼得森的实验结果感到满意。阿西莫夫这样评价彼得森的实验：

“在太平洋中部两英里高空，空气中几乎不含地球尘埃。此外，彼得森特别关注尘埃中的钴含量，因为流星尘埃钴含量高，而地球尘埃钴含量低。”²⁰

事实上，阿西莫夫对彼得森的研究成果非常有信心，他甚至直接采用了彼得森提出的每年有 1430 万吨陨石尘埃落到地球表面的数据来进行自己的计算。因此，阿西莫夫提出了以下观点：

“当然，这种情况年复一年地发生，地球作为一个固体天体已经存在了相当长的时间：或许长达 50 亿年。如果在这漫长的岁月中，陨石尘埃以与今天相同的速度沉降到地球上，那么

到现在，如果不受干扰，它将在地球上形成一层 54 英尺厚的尘埃层。”²¹

这听起来像是对神创论的有力佐证，但当然，阿西莫夫写下这些话是在 1959 年，此后人们进行了大量的陨石尘埃通量测量。批评者也很快指出了这一点——

“……我们现在可以利用飞机、高空气球和航天器进行粉尘收集。这些技术使研究人员能够避免困扰彼得森的大气粉尘问题。”²²

然而，问题在于如何确定哪种估算陨石尘埃输入量的技术能够给出“真实”数值。就连菲利普斯也承认这一点，他说：

“（技术手段多种多样，从使用带有收集网格的高空火箭到深海岩芯样本。不同方法获得的吸积率从每年 10^2 吨到 10^9 吨不等。即使^采_用相同的方法，由于所测量颗粒尺寸范围不同，结果也会有所差异。”²³

人们不禁要问，为什么佩特森提出的每年 50 亿至 140 亿吨的数据会被抨击为“暂定”、“极具推测性”和“完全错误”，而其中一位批评者却公开承认，采用不同的、更现代的方法得出的结果在每年 1000 亿至 10 亿吨之间，甚至即使是相同的方法得出的结果也会

有所不同？此外，值得注意的是，菲利普斯是在 1978 年写下这段话的，比佩特森的研究晚了近二十年，而且那时已经进行了多次登月！

(a) 太空尺寸小 (<0.1 厘米)

穿透卫星	年产量
A1 ²⁶ (海洋沉积物)	36,500-182,500 吨；
稀有气体	年产量
黄道云	73,000-3,650,000 吨；
(i)	年产量<3,650,000 吨；
(ii)	年产量
	91,500-913,000 吨； 年产量
	73-730 吨

(b) 彗星流星 (^{10⁴} – ^{10²} 克) 在太空

彗星流星	年产量 73000 吨
------	-------------

(c) 太空中的“任意”尺寸

巴巴多斯 网	
--------	--

格	年产量低于 110 吨
(i) 球体	低于 730 吨
(ii) 冬季总量	低于 22 万吨
(iii) 年度	低于 20 万吨
气球网格	低于 9.15 万吨
飞机过滤器	365 万吨
气球	36.5 万吨
(i) 尘埃计数器	365 万至 1100 万吨
(ii) 日冕仪	低于 365 万吨
Ni (南极冰)	11 万吨
Ni (海洋沉积物)	182.5 万吨 36.5 万至
Os (海洋沉积物)	365 万吨
CI ³⁶ (海洋沉积物) 海沉积物球体	

(d) 太空中大尺寸

无线电波	36,500 吨/年
陨石	365-3,650 吨/年

表 1. 地球陨石尘埃输入量的测量值和估算值。（数据改编自 Parkin 和 Tilles²⁴，他们已完整列出所有数据来源。）（所有数字均已四舍五入。）

其他估算方法，特别是化学方法

1968 年，帕金和蒂勒斯汇总了当时所有关于陨石（星际）物质（尘埃）流入量的测量数据，并将其制成表格。²⁴他们的表格在此以表 1 的形式重现，但他们给出的流入量单位是吨/天，为了便于与彼得森的数据进行比较，我们已将其转换为吨/年。

即使只是快速浏览一下表 1，也能证实大多数实验测得的数据远低于 Pettersson 提出的每年 500 万至 1400 万吨的数值。但 Phillips（上文引用）指出，即使采用相同的方法，结果也会存在很大差异，这一点可以通过观察某些技术下列出的结果范围得到充分验证。事实上，结果还取决于进行测量（或在某些情况下进行估算）的实验人员。例如，用于估算流入速率的天文方法之一，依赖于计算产生黄道光的太空极细尘埃的密度。表 1 中列出了两位不同研究者的估算值，因为它们相差 2 到 3 个数量级。

另一方面，Parkin 和 Tilles 对陨石流入量测量的回顾虽然全面，但并不详尽，他们并未提及其他一些估算值。例如，Pettersson²⁵也提到了哈佛大

学的 F. G. Watson（前文已引用）基于陨石数据得出的每年 36.5 万至 365 万吨的流入量估算值，该估算值与 Parkin 和 Tilles 列出的估算值（见表 1）相差 2-3 个数量级。因此，面对如此众多相互矛盾、数量级相差如此之大的估算数据，我们该如何确定哪个估算值最接近“真实”值呢？

另一篇重要的研究论文也发表于 1968 年。科学家巴克和安德斯报告了他们对太平洋中部海盆深海沉积物（红土）中铍和钪浓度的测量结果，他们认为这些沉积物可以限制包括尘埃在内的宇宙物质的流入速率。²⁶与之前的彼得森一样，巴克和安德斯也基于这样的观察：尽管铍和钪在地壳岩石中含量极低，但在陨石中却大量存在。

元素	采样点	增生率 (吨/年) *
镍	表层	40, 000, 000
铁 镍	表层	200, 000, 000
镍	太平洋沉积	3, 000, 000
铁 镍	物	40, 000, 000
铍 铍 钪	太平洋沉积	<100, 000
	物	<100, 000
	平流层	80, 000

。	南极冰	60, 000
	太平洋沉积物	<50, 000
	太平洋沉积物	
	太平洋沉积物	
。		
* 以 C1 碳质球粒陨石（陨石的一类）的成分进行标准化。		

表 2. 用化学方法估算宇宙物质的吸积率（根据 Barker 和 Anders ²⁶ 的研究，他们完整地引用了所有数据来源）。

他们的研究成果列于表 2（最后四项估算值）中，同时还列出了其他研究人员使用类似或其他化学方法得出的早期估算值。他们得出结论，与陨石（C1 碳质球粒陨石）中的铀浓度相比，他们的分析结果表明，整个地球的陨石输入速率在每年 30, 000 至 90, 000 吨之间。此外，他们认为，如果假设深海沉积物中的所有铀和钍都来自宇宙，则可以得到输入速率的确切上限值。由此得出的值在每年 50, 000 至 150, 000 吨之间。然而，需要注意的是，这些科学家谨慎地使用了输入速率范围而非确切数值，以考虑误差范围。不过，一

些近期的作者引用 Barker 和 Anders 的结果时，将其数值改为 100,000 吨，而不是 $100,000 \pm 50,000$ 吨。这看起来似乎不是一个相当关键的区别，除非我们意识到我们谈论的是 50% 的误差范围，无论引用的结果大小如何，这在任何语言中都是一个相当大的误差范围。

尽管巴克和安德斯的研究成果发表于 1968 年，但十五年后，大多数作者仍然引用他们提出的每年 $100,000 \pm 50,000$ 吨的陨石流入量，认为这是我们通过化学方法测得的最可靠的估计值。然而，加纳帕蒂对南极冰层铍含量的研究^{表明}，巴克和安德斯的估计值低估了全球每年的陨石流入量。

1974 年，加纳帕蒂从美国南极阿蒙森-斯科特基地钻取的冰芯中提取冰样，并分析了其中的铍含量。过去一个世纪左右南极冰层的积累速率如今已相当确定，因为冰层中存在两个非常可靠的精确时间标记：1884 年（1983 年 8 月 26 日喀拉喀托火山喷发的碎片沉积于冰层中）和 1953 年（核爆炸开始将裂变产物沉积于冰层中）。有了如此精确的时间参考框架来解读他的铍分析结果，加纳帕蒂得出全球陨石输入量为每年 40 万吨，是巴克和安德斯根据太平洋中部沉积物估算值的四倍。

为了佐证他的估算，加纳帕蒂还指出，巴克和安德斯曾表示，如果将几个不利的假设叠加起来，他们的估算值可以扩大到原来的三倍（即每年 30 万吨）。此外，凯特和沃森近期对钻探获得的深海沉积物样本中铱的测量结果显示，每年的陨石物质流入量约为 33 万至 34 万吨。²⁸因此，加纳帕蒂估算的每年 40 万吨陨石物质流入量似乎相当可靠，尤其因为它是基于一个精确已知的参考时间框架。

利用飞机和航天器方法进行估算

以上便是测定地球表面陨石年输入量的化学方法。那么，高空飞机和航天器收集的数据又如何呢？一些批评人士^{29, 30}坚称，这些数据能提供最可靠的输入量估算，因为它们排除了地球尘埃污染的可能性。事实上，基于高空 U-2 飞机收集的尘埃数据，布里奇斯托克断言，输入量仅为每年 1 万吨

^{31, 32}。为了佐证他的观点，布里奇斯托克引用了布拉德利、布朗利和韦布伦

³³ 以及迪克森、麦克唐纳¹和凯里³⁴的报告，这些报告也指出，星际尘埃颗粒的年输入量为 1 万吨。诚然，正如布里奇斯托克所说，^{迪克森}、麦克唐纳和凯里确实报告称，“……研究人员估计每年约有 1 万吨宇宙尘埃落到地球。”

³⁶ 然而，布里奇斯托克急于证明自己的观点，甚至不惜断章取义，显然他并没有仔细阅读、充

分理解，或者故意忽略了迪克森、麦克唐纳和凯里报告的全部内容，否则他就会注意到，“每年约有 1 万吨宇宙尘埃落到地球”这个数字仅指一种名为布朗利粒子的特殊粒子，而非所有宇宙尘埃粒子。为了澄清这一点，让我们引用迪克森、麦克唐纳和凯里的话：

过去十年间，这项技术已成功捕获了大量被称为“布朗利粒子”的蓬松小宇宙尘埃颗粒。布朗利粒子以美国研究员唐·布朗利的名字命名，他率先利用飞机常规收集这些颗粒，并主导了它们的分类工作。它们的结构和成分表明，布朗利粒子的确起源于外太空（见方框 2），研究人员估计每年约有 1 万吨布朗利粒子落到地球上。但布朗利粒子仅代表宇宙尘埃颗粒总量的一部分。³⁷（重点为笔者所加）

此外，说到这些“蓬松的”布朗利颗粒：

“然而，最轻最蓬松的尘埃颗粒进入大气层时，其轨迹几乎不会受到任何破坏性影响，最终会飘落到地面。在那里，这些颗粒与来自较大天体燃烧成流星的大量碎片混合在一起，很难将两者区分开来”³⁸（重点为我们所加）。

当然，布里奇斯托克所做的，是说根据迪克森、麦克唐纳和凯里的研究，每年撞击地球的宇宙尘埃总量为

1 万吨，而这些科学家非常明确地指出，他们指的只是宇宙尘埃总量的一部分，而且还是相当一部分。许多撰写此主题的作者都无意中犯了类似的错误。

但这引出了整个问题的一個关键方面，即到达地球（以及月球）的陨石物质实际上大小不一，从直径达数米、撞击后会形成巨大陨石坑的大型陨石，到迪克森、麦克唐纳和凯里上文提到的被称为布朗利颗粒的微观

“蓬松”尘埃，应有尽有。此外，用于探测这些陨石物质的各种技术未必能全面反映所有到达地球的颗粒大小，因此研究人员需要谨慎，不要将使用特定技术测量的特定粒径范围的陨石颗粒流入量等同于陨石颗粒的总量。当然，这也是为什么该领域经验丰富的研究人员总是会在记录中明确注明他们所测量的粒径范围的原因。

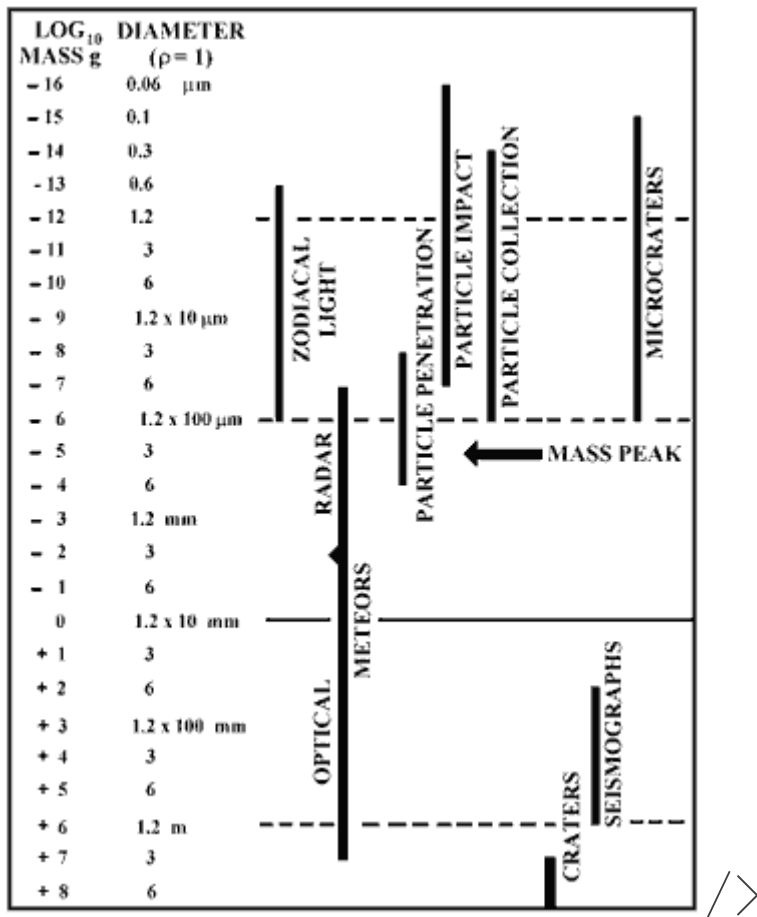


图 1. 利用各种技术探测到的行星际（陨石）尘埃颗粒的质量范围（改编自 Millman³⁹）。颗粒穿透、撞击和收集技术均利用卫星和火箭。斜体字所示的技术基于月球表面测量。

Millman³⁹讨论了各种测量技术适用的粒径范围问题。图 1 是 Millman 图表的改编版。值得注意的是，化学方法，例如对南极冰或太平洋深海沉积物中铱的分析，几乎涵盖了陨石颗粒的全部粒径范围，由此得出结论：这些化学方法最有可能给出最接近“真实”流入量的估计值。然而，Millman⁴⁰和 Dohnanyi⁴¹采用了不同的方法来获得流

入量估计值。他们认识到大多数测量技术仅测量特定粒径范围的颗粒流入量，因此将所有技术的结果结合起来，以获得代表所有粒径范围的总流入量估计值。由于各种技术之间存在重叠（如图 1 所示），他们绘制了所测量颗粒的累积数量（或累积通量）与被测颗粒质量之间的关系图，其中质量数据来自各种测量技术。图 2 展示了这样的曲线。图 2 中的曲线是加权平均通量曲线，它是通过比较、相加并取任意质量范围内各种测量技术所得结果的平均值而得到的。然后，通过在给定质量范围内对加权平均通量曲线下的总质量进行数学积分，即可得到总通量估计值。

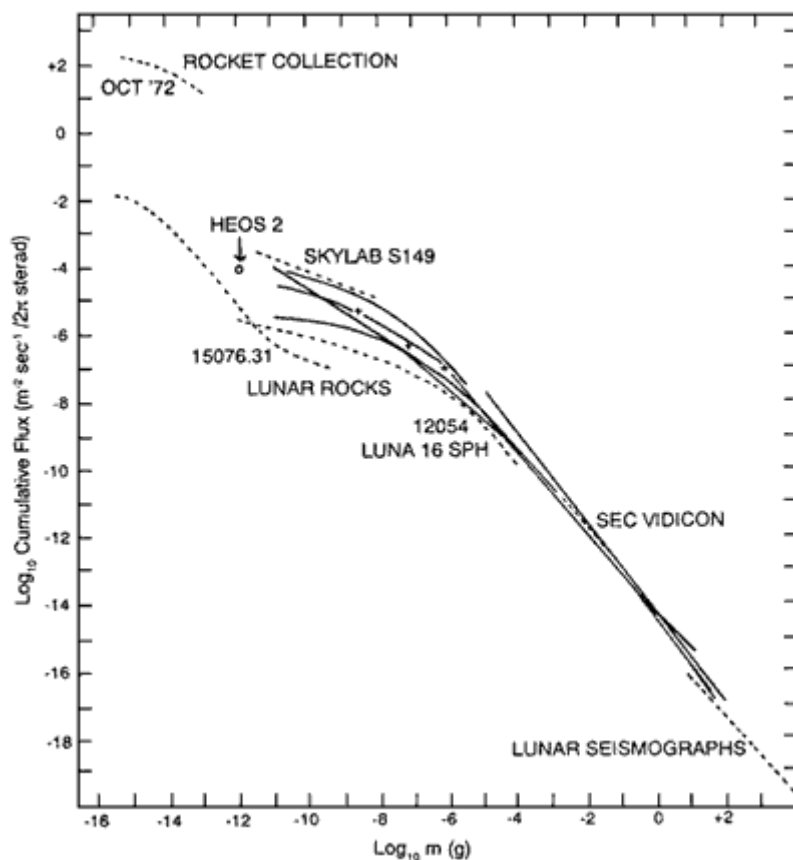


图 2. 粒子累积数量与其计数质量下限之间的关系，数据来源于多种记录方式——火箭、卫星、月球岩石、月球地震仪（改编自 Millman³⁹）。十字标记代表飞马座号和探险者号的穿透数据。

米尔曼⁴² 据此估算，质量范围在 10^{-12} 克到 10^3 克之间的陨石物质，每天仅有 30 吨左右到达地球，相当于每年 10950 吨。不出所料，那位错误地引用迪克森、麦克唐纳和凯里提出的每年 1 万吨数据来捍卫其“月球和地球已有数十亿年历史”观点的批评家（布里奇斯托克），也同样接受了米尔曼提出的每年 10950 吨的数据。⁴³ 但布里奇斯托克未能理解的是，迪克森、麦克唐纳和凯里的数据仅指质量范围在 10^{-12} 至 10^{-6} 克之间的所谓布朗利粒子，而米尔曼的数据，正如他自己所指出的，涵盖了 10^{-12} 至 10^3 克的质量范围。这两个数据根本无法相提并论，因为它们根本不在同一量级，实际上它们讨论的是不同的粒子质量范围。

此外，当这两个数字指的是不同的质量范围时，它们的对应关系非常密切——迪克森、麦克唐纳和凯里计算出的每年 1 万吨的数据仅占米尔曼计算出的每年 10950 吨数据的 40%——这表明推导这些数据的方法可能存在问题。即使只看图 2 中的曲线，也能明显看出，在 10^{-6} 至 10^3 克的质量范围内，曲线下面积所代表的总质量不太可能只有每年 950 吨左右

（即米尔曼的数据与迪克森、麦克唐纳和凯里的数据及其质量范围之间的差异），尤其是在假设 10^{-12} 至 10^{-6} 克的质量范围内，曲线下面积所代表的总质量为每年 1 万吨的情况下（迪克森、麦克唐纳和凯里的数据及其质量范围）。米尔曼甚至认为，证据表明地球遇到的尘埃复合体总质量的三分之二是以质量介于 $10^{-6.5}$ 克和 $10^{-3.5}$ 克之间的颗粒形式存在的，或者分别处于 10^{-6} 克、 10^{-5} 克和 10^{-4} 克这三个数量级，^这远远超出了所谓的布朗利颗粒的质量范围。因此，如果迪克森、麦克唐纳和凯里在 1985 年提出的每年 1 万吨布朗利颗粒（质量范围 10^{-12} 克至 10^{-6} 克）的数据更接近事实’ 并且如果总颗粒流入质量的三分之二位于布朗利颗粒的尺寸范围之外，那么米尔曼在 1975 年提出的每年 10,950 吨的数据必然远远低于“实际”流入量，因此实际流入量至少为每年 3 万吨。

米尔曼承认，如果某些更细小的尘埃颗粒无法被卫星或飞机收集面板穿透或撞击坑所探测到，那么我们或许应该提高通量估算值来弥补这一不足。此外，他还指出，草原网络（Prairie Network）的火球

（McCrosky ⁴⁵）也应该被纳入他的数学积分计算范围，因为它们超出了他平均加权通量曲线的质量范围，而这些火球可能会显著增加他的通量估算值。⁴⁶ 换句话说，米尔曼承认，如果他计算中使用的质量范围能够同时

考虑小于 10^{-12} 克的颗粒，特别是大于 10^3 克的颗粒，那么他的通量估算值将会大幅增加。

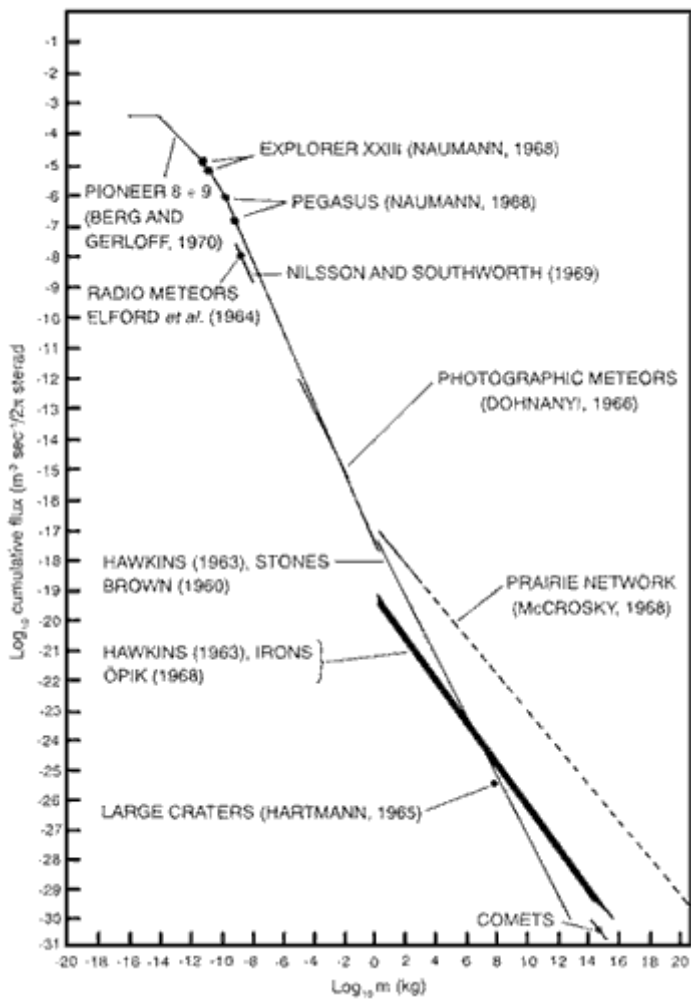


图 3. 质量为 $M(\text{kg})$ 的流星体及相关物体进入地球大气层的累积通量（改编自 Dohnanyi⁴¹）。他用于推导此图的数据来源列于其参考文献中。

与米尔曼不同，多纳尼⁴⁷考虑了更宽的质量范围和更小的累积通量，如图 3 所示的累积通量图所示，因此他得出了更高的总尘埃流入量估计值，约为每年 20,900 吨。同样，如果多纳尼纳入麦克罗斯基关于草原网络火球的数据，那么他的流入量估计值会更

高。此外，多纳尼的估计主要基于据称更可靠的直接测量数据，这些数据是通过卫星上的收集板和面板获得的。但米尔曼认为，这种卫星穿透方法可能无法检测到更细小的尘埃颗粒，因为它们既不会穿透收集板，也不会收集板上留下凹坑，因此任何基于此类数据的流入量估计值都可能低估了“真实”数值。这一点尤其重要，因为米尔曼还强调，在卫星穿透数据收集理论有效范围的下限，质量范围为 10^{-13} 至 10^{-14} 克时，存在另一个浓度峰值（再次参见图 1）。因此，即使是多纳尼的流入量估计值也可能远低于“真实”值。

代表性和假设

这就引出了一个问题：每种尘埃收集技术及其估算的尘埃流入量在物理和统计学上的代表性究竟如何？例如，安装在小型卫星或 U-2 飞机上的小型采样板上收集的尘埃样本，与它所代表的巨大空间体积相比，究竟有多大的代表性？我们已经看到，米尔曼承认，一些尘埃颗粒可能不会像预期那样穿透采样板或在其表面形成凹坑，因此最终的颗粒计数会因此减少一个未知的量。那么，从海底钻取的岩芯或抓取样本又有多大的代表性呢？毕竟，我们分析的难道不是从 1-2 公斤的样本中抽取一部分，并以此来代表覆盖数千平方公里海底的数吨沉积物，从而得出整个地球的尘埃流入量估算值吗？诚然，可能已经对海底的多个区域进

行了仔细的重重复采样和分析，但这些结果以及由此得出的尘埃流入量估算值，在物理和统计学上究竟有多大的代表性呢？

当然，Pettersson 利用莫纳罗亚山顶采集的尘埃数据得出的估算值也存在同样的代表性问题。许多研究人员在报告中都未能讨论此类问题。诚然，由于存在太多潜在的未知因素，任何统计量化几乎都不可能，但应该尝试讨论样本的代表性，并将其转化为最终报告的尘埃输入量估算值的误差范围的“估计”。一些研究，例如 Barker 和 Anders 利用深海沉积物得出的估算^值，误差范围高达 $\pm 50\%$ ，但即便如此，这些误差范围也仅仅是指他们根据数据集计算出的样本内和样本间元素浓度的变化，而不是对所采集和分析的样本的物理代表性的任何统计“估计”。然而，如果我们试图确定“真实”数值，后者至关重要。

但还有另一个更重要的考虑因素，即从原始测量或分析数据推导出尘埃输入量估算值时所使用的任何假设。最明显的例子体现在对深海沉积物分析结果的解读上，即如何估算宇宙尘埃的输入量。与所有化学方法一样，人们假设样品中所有超出相应地壳岩石平均含量的镍、铈和钐都存在于深海沉积物样品中的宇宙尘埃中。虽然这看似合理，但并不能保证其完全正确或可靠。此外，为了计算深海沉积物样品中额外镍、铈和钐浓度

所代表的宇宙尘埃量，人们假设宇宙尘埃中镍、铍和钪的浓度与 I 型碳质球粒陨石（陨石的主要类型之一）中的平均浓度相当。但是，这种类型的陨石能够代表到达地球表面的所有宇宙物质吗？像 Barker 和 Anders 这样的研究人员之所以这样假设，是因为其他人也都这么认为！诚然，做出这种假设有其合理之处，但 I 型碳质球粒陨石是否能代表所有到达地球表面的宇宙物质，这一点远未可知，因为迄今为止几乎不可能专门收集这类物质进行分析。（航天器和 U-2 飞机已经收集到一些样本，但这些样本仍然不能代表到达地球表面的宇宙物质的全部组成，因为它们仅代表特定路径或高层大气中特定质量范围的粒子。）

然而，最重要的假设尚未出现。为了根据深海沉积物中镍、铍和钪浓度的假定宇宙成分来估算输入量，必须确定所分析的深海沉积物代表的时间跨度。换句话说，所采样海底区域的沉积速率是多少？因此，我们的沉积物样本有多古老？基于均变论和进化论的假设，同位素测年和化石含量被用来赋予沉积物较长的时间跨度和古老的年龄。这不仅体现在 Barker 和 Anders 的研究中，也体现在 Kyte 和 Wasson 的工作中，他们通过测量所谓上新世和始新世-渐新世深海沉积物中的铍含量来估算输入量。⁴⁹ 然而，对于这些研究人员来说，不幸的是，他们的输入量估算

完全依赖于其测年和年龄假设的有效性。这一点至关重要，因为如果他们基于均变论和进化论的假设（缓慢沉积和古老地质年代）分别得出每年 10 万吨和 33 万至 34 万吨的流入量估计值，那么如果沉积作用在极短的时间跨度内迅速发生，这些流入量估计值又会如何变化呢？基于此，佩特森提出的每年 500 万至 1400 万吨的数字并非牵强附会！

另一方面，加纳帕蒂对南极冰芯的研究并不存在任何关于冰芯样本年龄的假设，因为他能够将分析结果与近期有记录的历史中的两个时间标记事件联系起来。因此，他估算的每年 40 万吨的流入量值得认真对待。此外，化学方法估算流入量的优势之一，例如加纳帕蒂对冰芯中铍的分析，在于该技术在理论上（可能在实践中也是如此）涵盖了宇宙物质的完整质量范围（与其他技术不同——再次参见图 1），因此应该能给出更准确的估算。当然，在实践中很难验证这一点，从统计学角度来看，在例如冰芯中采样到宏观宇宙粒子的可能性几乎为零。换句话说，又出现了“代表性”的问题，因为冰芯被认为代表了更大面积的冰盖，而冰芯所截取的横截面区域很可能宇宙尘埃颗粒的浓度异常高或异常低，或者实际上是平均浓度——谁知道是哪种情况呢？

最后，许多从事该领域研究的人员并未意识到一个额外的问题，那就是尘埃输入速率似乎会随纬度而变化。Schmidt 和 Cohen 报告称^{⁵⁰}，这种明显的变化与地磁纬度关系最为密切，因此在两极地区，尘埃输入量高于赤道地区。他们认为，电磁相互作用可能导致某些带电粒子优先在高纬度地区撞击。这或许可以解释 Ganapathy 基于南极冰层尘埃研究得出的每年 40 万吨的尘埃输入量估计值，与 Kyte 和 Wasson 基于中太平洋深海沉积物样本中铍含量测量得出的每年 33 万至 34 万吨的估计值之间的差异。

进一步估算

许多其他研究人员也对流入地球的陨石尘埃量进行了估算，这些估算结果常常被奉为圭臬。直到今天，人们仍在不断进行估算，因此对比这些估算结果对于达成普遍共识至关重要。

在回顾了当时各种方法得出的估算结果后，辛格和班^德曼于 1967 年提出，确定地球陨石尘埃输入量的最准确方法是对深海沉积物中的放射性铝-26 进行放射化学测量。他们对这种方法充满信心，因为可以证明这种放射性核素的唯一来源是星际尘埃，因此，其在深海沉积物中的存在比任何其他化学证据都更能可靠地指示尘埃的存在。根据其他测量结果，他们得出结论，输入速率为每天 1250 吨，但由于误差范围较大，他们

指出输入速率可能低至每天 250 吨，也可能高达每天 2500 吨。这些数字相当于每年超过 45 万吨的输入速率，范围在每年 9.13 万吨到 91.3 万吨之间。

他们还为此种估算方法辩护，认为它优于其他方法。例如，他们指出，卫星实验从未测量过粒子浓度，甚至连简单的粒子通量都无法测量，而只是测量具有特定动量或能量的粒子通量，该动量或能量大于某个最小阈值，而该阈值取决于所使用的探测器。此外，他们认为，地球附近的撞击率应该比远离地球的撞击率高出约 1000 倍。虽然也可以在高层大气中测量尘埃输入，但此时粒子已经开始减速，因此大气中任何垂直方向的质量运动都可能导致尘埃粒子浓度的增加，从而产生虚假结果。因此，基于这些以及其他原因，辛格和班德曼坚信，他们基于海洋沉积物中放射性铝⁻²⁶的估算方法是对地球尘埃质量输入率以及行星际空间尘埃质量浓度的可靠测定。

其他研究人员继续依赖卫星、无线电和目视测量相结合的方法，对“不同粒子质量”进行测量，以得出累积通量率。因此，1974 年休斯报告了⁵²个数据，

“根据最新的累积流入率数据，质量范围为 10^{-13} – 10^{-6} 克的星际尘埃流入地球表面的速率为 5.7×10^{-9} 克 yr^{-1} ”。

或每年 5700 吨，远低于辛格和班德曼根据海洋沉积物中 Al^{26} 的估算值。然而，不到一年，休斯就将他的估算值向上修正为 1.62×10^{10} 克/年’ 误差计算表明其上限和下限分别约为 3.0×10^{10} 克/年和 0.8×10^{10} 克/年。⁵³ 同样，这是针对 10^{-13} 克至 10^6 克之间的颗粒质量范围而言的，该估算值相当于每年 16200 吨，上下限分别为每年 8000 吨至 30000 吨。休斯现在对他用于计算的数据如此自信，以至于他在广受欢迎的科普杂志《新科学家》上发表了一篇更易于理解的研究报告。⁵⁴ 在这里’ 他再次论证了……

“地球绕太阳公转时，每年会吸收大约 16000 吨星际物质。这些颗粒大小不一，从重达数吨的巨大陨石到直径小于 0.2 微米的微小颗粒都有。其中大部分来自衰变的彗星。”

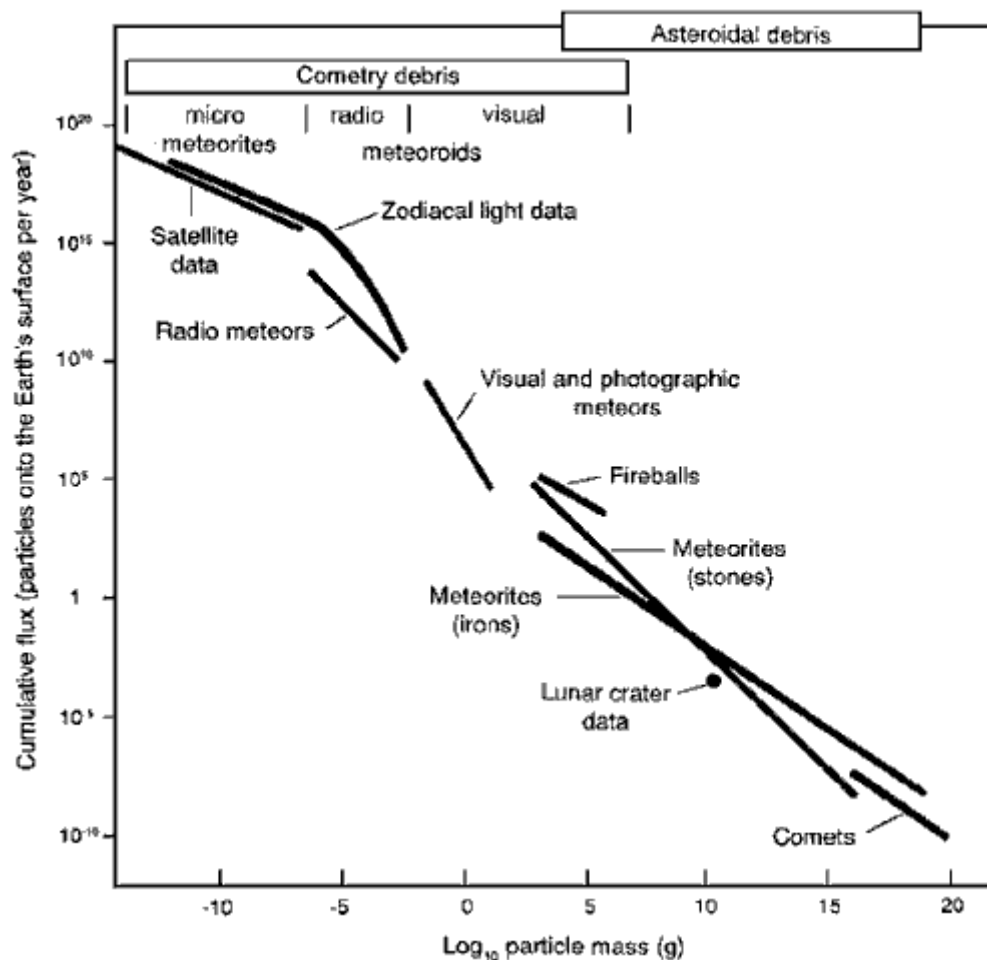


图 4. 星际物质（陨石、流星、陨石尘埃等）进入地球大气层的累积通量图（改编自 Hughes⁵⁴）。请注意，他根据质量将这些碎片分为彗星来源和小行星来源两类，其中彗星来源又根据探测技术进一步细分。根据该图，Hughes 计算出每年的通量为 16,000 吨。

图 4 显示了休斯利用各种数据源构建的累积通量曲线，他据此计算出每年约 16,000 吨的流入量。然而，值得注意的是，米尔曼 (Millman)⁵⁵ 在 1975 年和多纳尼 (Dohnanyi)⁵⁶ 在 1972 年使用类似的数据和相同的方法，分别得出了每年 10,950 吨和 20,900 吨的流入量估计值（图 2 和

图 3 可与图 4 进行比较)。尽管如此,可以说这两个估计值仍然在休斯提出的每年 8,000 至 30,000 吨的范围内。无论如何,休斯对自己估计值的信心还体现在他再次引用了同样的每年 16,000 吨的流入量数据,而这一数据发表在一本关于宇宙尘埃的权威著作中⁵⁸。

与此同时,韦瑟里尔(Wetherill)在1976年采用了一种颇为新颖的方法来解决这个问题,他通过研究陨石尘埃源头可能的产生速率,估算了陨石尘埃的输入量。⁵⁹他认为,尽管目前陨石的来源可能不止一个,彗星和各种小行星都可能对地球上的陨石通量有所贡献,但陨石的直接来源是那些绕太阳运行并穿过地球轨道的小行星,即所谓的阿波罗天体。随后,他计算了这些阿波罗天体破碎和撞击产生的陨石尘埃(流星体)和陨石的质量产量。他发现,撞击和完全破碎产生的总产量为 $7.6 \times 10^{10} \text{ g yr}^{-1}$, 换算成每年约 76,000 吨。他据此计算得出,每年 190 吨陨石的质量范围在 $10^2 - 10^6$ 克之间,这一数值与通过其他计算方法获得的地球陨石撞击质量率以及其他直接测量数据(包括对实际陨石通量的观测)相当吻合。当然,每年 76,000 吨的陨石量远高于基于累积通量计算的估计值(例如 Hughes 等人的计算结果)⁶⁰,但仍低于对深海沉积物进行各种化学

分析的结果范围（例如 Barker 和 Anders⁶¹、Kyte 和 Wasson⁶² 以及 Singer 和 Bander mann⁶³ 的研究），^也低于 Ganapathy⁶⁴对 南极冰层进行分析的结果范围。难怪一位天文学领域的研究人员编写并于 1983 年出版的天文学教科书中给出的流星体总通量约为每年 10,000–1,000,000 吨⁶⁵。

在 1985 年发表的一篇经常被引用的论文中，格林及其同事⁶⁶ 报告了另一项累积通量计算，但这次主要基于卫星测量数据。由于这些卫星测量是在行星际空间进行的，因此由此得出的数值将被视为行星际尘埃通量的度量。因此，要根据该数值计算地球上陨石的总质量输入量，必须同时考虑地球的重力增加和地球的表面积。结果得出的输入量约为每天 40 吨，相当于每年约 14,600 吨。当然，这与休斯⁶⁷的输入量估计值仍然相当接近。

除了卫星测量外，累积通量计算的另一个主要数据来源是地面雷达测量。1988 年，奥尔森-斯蒂尔（Olsson-Steel）⁶⁸ 报告称，之前在甚高频（VHF）波段进行的雷达流星观测得到的粒子通量在 10^{-6} 至 10^{-2} 克质量范围内，与光学流星观测或卫星测量得到的通量相比异常低。因此，他认为必须使用高频（HF）雷达才能探测到进入地球大气层的总通量。为此，他利用位于澳大

利亚阿德莱德和爱丽丝泉附近的雷达装置，在高频波段的多个不同频率上进行了测量。事实上，奥尔森-斯蒂尔认为，当时爱丽丝泉附近的雷达是迄今为止用于流星探测的最强大的设备，并且由于其灵敏度极高，流星计数率也极高。根据这些数据，他计算出质量范围在 10^{-6} 至 10^{-2} 克之间的粒子总流入量为每年 12,000 吨，正如他所指出的，这与休斯计算出的相同质量范围内的通量几乎相同。⁶⁹，⁷⁰他得出结论，这意味着，忽略偶尔发生的小行星或

彗星撞击，该质量范围内的流星体主导了进入大气层的总通量，他指出，根据托马斯等人的计算，该通量约为每年 16,000 吨。⁷¹

1987 年, Maurette 及其同事⁷²提出了一种不同的利用冰作为陨石尘埃收集器的方法，并报告了他们对从格陵兰冰盖融化区采集的黑色尘埃样本中提取的陨石尘埃颗粒的分析结果。该技术的原理是，冰盖边缘正在融化的冰，自其在内陆形成并向外流至融化区以来，一直在收集各种大小和质量的宇宙尘埃。分析所得的尘埃量代表了该时间段内的总通量，进而可以将其转换为年通量。虽然他们对收集到的尘埃颗粒的分析是基于粒径分级的，但他们依靠 Griin 等人⁷³建立的质量-粒径关系将结果转换为通量估算值。他们计算得出，他们收集的每一公斤用于提取和分析其中所含陨石尘埃的黑色尘埃，都相当于一个面积约为 0.5 平方米的收集器表面，该表面已暴露于陨石尘埃降落约

3000 年。将他们列出的 300 微米以下各粒径组分的通量估计值加在一起，得出陨石尘埃总流入量估计约为每年 4,500 吨，远低于卫星和雷达测量计算出的值，并且远低于冰的化学分析计算出的值。

然而，至少可以说，与化学方法相比，这项技术是基于对陨石尘埃颗粒的实际识别，而不是期望化学分析结果能够代表所分析尘埃总样本中的陨石尘埃成分。尽管如此，几乎在同一时间，另一极地地区的一项独立研究得出了更高的输入速率，这与根据卫星和雷达测量计算出的速率更为吻合。在该研究中，Tuncel 和 Zoller⁷⁴测量了在南极采集的大气样本中的铍含量。在每个为期 10 天的采样周期内，大约 20,000 至 30,000 立方米的空气通过直径为 25 厘米的纤维素滤膜，然后进行各种分析。在 11 个月的时间里，共采集了 30 个这样的大气颗粒物样本，从而确保了季节性变化的影响。根据他们的分析，他们排除了火山喷发物对样品中铍元素的贡献，并得出结论：样品中的铍浓度可用于估算大气颗粒物样品中的陨石尘埃成分，进而估算全球陨石尘埃的输入速率。由此，他们计算出全球陨石尘埃通量为每年 6000 至 11000 吨。

为了评估他们的结果，他们汇总了文献中通过多种方法（包括冰和沉积物的化学分析）得出的其他估算值。

为了反驳这些化学方法得出的更高估算值，他们指出，跨越较长时间间隔的样本（尤其是沉积物样本）除了包含背景尘埃颗粒外，还包含大型天体撞击产生的碎片。他们认为，这意味着化学方法无法区分背景尘埃颗粒和大型天体撞击产生的碎片，因此，从沉积物样本估算出的通量中，很大一部分可能来自此类大型天体撞击。另一方面，他们认为，对于小于 $10^{6\text{克}}$ 的颗粒，他们估算的每年 6000 至 11000 吨的通量与卫星和雷达研究的估算值基本吻合。

最后，在后续研究中，莫雷特及其同事⁷⁵研究了大量微陨石样本，这些样本是通过融化和过滤南极冰盖上约 100 吨冰而收集的。他们首先利用目视技术对样本中的颗粒进行分类，将其归类为基本的陨石类型，然后对选定的颗粒进行各种化学和同位素分析。例如，氦同位素分析被用于确认哪些颗粒来自外太空。他们还参考了之前的研究，得出结论：从格陵兰岛或南极冰盖回收的、粒径在 50-300 微米范围内的陨石尘埃通量粗略估计约为地球总质量输入量的三分之一，约为每年 2 万吨。

科学家（年份）	技术	流入量估算（吨/年）
彼得森	大气尘埃	14, 300, 000

(1960)	中的镍	
Barker 和 Anders (1968)	深海沉积 物中的铀 和钍	100, 000 (50, 000 – 150, 000)
甘纳帕蒂 (1983)	南极冰中 的铀	40 万
Kyte 和 Wasson (1982)	深海沉积 物中的铀	33 万 – 34 万
米尔曼 (1975)	卫星、雷 达、视觉	10, 950
多赫纳尼 (1972)	卫星、雷 达、视觉	20, 900
辛格和班德曼 (1967)	深海沉积 物中的 Al ²⁶	456, 000 (91, 300 – 913, 000)
休斯 (1975–1978)	卫星、雷 达、视觉	16, 200 (8, 000 – 30, 000)
韦瑟里尔 (1976)	阿波罗小 行星的碎 裂	76, 000

Grün 等人（ 1985）	卫星数 据，特别 是	14, 600
奥尔森-斯蒂尔 （1988）	主要雷达 数据	16, 000
Maurette 等人 （ 1987）	格陵兰冰 层融化产 生的尘埃	4, 500
Tuncel 和 Zoller （1987）	南极大气 颗粒物中 的铍	6, 000 – 11, 000
Maurette 等人 （ 1991）	南极冰层 融化产生 的尘埃	20, 000

表 3. 通过不同测量技术估算地球陨石尘埃输入量的
汇总。

结论

过去三十年间，人们尝试了多种方法来估算进入地球的
陨石尘埃量。表 3 总结了本文讨论的估算结果，其
中大部分在文献中都有反复提及。

显然，文献中对于年输入量尚无共识。诚然，如今没有任何权威人士会认同佩特森在 1960 年提出的每年 1400 万吨的数据。然而，目前似乎存在两大类：一类是化学方法，其结果在每年 10 万至 40 万吨左右；另一类是其他方法，特别是基于卫星和雷达数据的累积通量计算，其结果在每年 1 万至 2 万吨左右。有人认为，由于相关技术的灵敏度限制，卫星测量结果偏低；而另一些人则认为，化学方法包含了背景尘埃颗粒和裂解产物。

或许最“稳妥”的做法是给出陨石尘埃流入速率的区间范围。这正是几位该领域权威人士在编写教科书时所采用的方法。例如，Dodd⁷⁶ 建议日流入速率在 100 至 1000 吨之间，换算成年流入量为 36500 至 365000 吨；而 Hartmann⁷⁷（他引用了 Dodd 的观点）则给出了每年 10000 至 100 万吨的流入量。Hartmann 给出的流入量范围确实涵盖了表 3 中的估算值，但其上限值可能略微偏高。为了避免这个问题，同时又能涵盖广泛的估算值，Henbest 在 1991 年发表于《新科学家》杂志⁷⁸ 的文章中 写道：

*“尽管这些尘埃颗粒单个很小，但它们在行星际空间中数量如此之多，以至于地球每年都会扫起大约 10 万吨宇宙尘埃。”*⁷⁹

或许这是一种“稳妥”的折衷方案！

然而，总的来说，我们必须指出，当莫雷特及其同事将化学方法重新应用于极地冰盖时，其得出的通量估算值与基于卫星和雷达数据得出的结果相似，但远低于加纳帕蒂早期对极地冰盖的化学分析结果。因此，更合理的结论似乎是，大多数数据表明，冰盖的流入速率在每年 1 万至 2 万吨之间，但也不排除该数值可能达到每年 10 万吨。

月球尘埃涌入

Van Till 等人建议：

“为了合理估算月球上陨石尘埃的积累量，我们将地球每年 16000 吨的积累率除以 16（因为月球表面积较小），再除以 2（因为月球引力较小），得出月球上陨石尘埃的积累率约为每年 500 吨。” ⁸⁰

然而，哈特曼⁸¹根据他自己发表的作品⁸²提出了每年 4000 吨的数字，尽管这一估计也是根据地球的流入率计算出来的，考虑到了月球较小的表面积。

当然，这些估算是基于地球-月球系统周围太空区域的陨石尘埃密度相当均匀的假设，这一假设已得到卫星测量的证实。然而，随着 1969 年至 1972 年美国阿波罗登月任务的开展，人们获得了采集月球岩石和土壤

样本的机会，并能够更直接地测量月球陨石尘埃的输入量。

月球岩石和土壤

最早基于实际月球样本的估算之一是由凯斯及其同事进行的⁸³。他们分析了阿波罗 11 号任务带回的 12 个月球岩石和土壤样本中的微量元素。根据他们的分析结果，他们得出结论，这些样本中含有陨石或彗星成分，该成分相当于碳质球粒陨石类物质的输入速率为 $2.9 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。这相当于每年超过 15200 吨的输入速率。然而，需要注意的是，这一估算基于陨石成分代表超过 10 亿年时间积累的假设，给出的数值是该时间跨度内异常值的平均值。这些研究人员也提醒不要过分依赖这一估算，因为样本仅来自月球上的一个地点。

在短短几周内，六位研究人员中的四位发表了对他们早期工作的完整回顾，并附上了一些新数据。

⁸⁴ 为了获得新的陨石尘埃输入量估算值，他们将月壤和角砾岩样本中的微量元素含量与月岩样本中的微量元素含量进行了比较。当时的假设是，月壤和角砾岩是由破碎的岩石组成的，因此，岩石与月壤/角砾岩之间任何微量元素的差异都代表了岩石在机械破碎过程中添加到月壤/角砾岩中的物质。在确定

了月壤样本中这种“外来成分”的微量元素含量后，他们试图确定其来源。他们随后假设该区域（阿波罗 11 号着陆点或静海基地）的暴露时间为 36.5 亿年，因此在这段时间内，来自太阳风的质子通量将占土壤中外来微量元素成分的约 2%，其余约 98% 则来源于陨石（确切地说是“颗粒状”陨石）。进一步计算表明，这约 98% 的外来成分似乎是由约 1.9% 的碳质球粒陨石状物质（换句话说，某种特定类型的陨石尘埃）混合而成，因此，在 36.5 亿年的土壤形成历史中，其平均输入速率为 $3.8 \times 10^{-9} \text{ gcm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，相当于每年超过 19900 吨。然而，他们再次提醒，由于该估算仅基于来自一个地点的少量样本，因此需要谨慎对待。

然而，不到六个月，该研究小组的主要研究人员再次发表论文，公布了更多研究成果和更新的陨石尘埃输入量估算。⁸⁵此时，他们已从阿波罗 12 号着陆点采集了七个样本，其中包括两个结晶岩样本、四个从月壤“钻取”的岩芯样本和一个土壤样本。所有样本均再次送检进行一系列微量元素分析，并再次按照上述程序估算，该着陆点的外来成分约为 1.7% 的陨石尘埃物质，与阿波罗 11 号着陆点的土壤成分非常相似。由于阿波罗 12 号着陆点岩石的微量元素含量与阿波罗 11 号着陆点相似（尽管两地相距 1400 公里），暂且不考虑其他因素，他们得出结论：

“ 陨石成分的空间稳定性表明，根据阿波罗 11 号数据得出的流入速率 $3.8 \times 10^{-9} \text{ gcm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 是一个有意义的月球平均值。 ” ⁸⁶

因此，他们在论文摘要中报告说：

“ 因此，月球整体的 平均陨石流入速率约为每年每平方厘米 4×10^{-9} 颗 ” ⁸⁷

后一个数字换算过来就是每年约 20,900 吨的流入量。

具有讽刺意味的是，这与多纳尼利用卫星和雷达测量数据，通过累积通量计算得出的地球尘埃输入速率估算值相同。⁸⁸ 至于月球的陨石尘埃输入量，多纳尼估计，使用“适当的聚焦因子 2 ”，其约为地球输入量的一半，即每年 10450 吨。⁸⁹ 多纳尼为自己的估算值辩护，尽管他表示该估算值“略低于”凯斯、加纳帕蒂及其同事的独立估算值。他认为，考虑到其中存在的不确定性，他的估算值与他们的估算值“出奇地接近”。

尽管多赫纳尼认为，基于月球岩石化学研究的陨石尘埃输入量估算值与他主要基于卫星测量得出的估算值非常接近，但实际上前者比后者高出 50%到 100%。这一差异意义重大，此前已有研究解释了基于深海沉积物化学分析得出的地球陨石尘埃输入量估算值高于基

于卫星和雷达测量得出的相同累积通量估算值的原因。许多卫星测量实际上是从地球轨道卫星上进行的，因此人们一直认为这些测量结果也适用于月球。幸运的是，俄罗斯利用其月球轨道卫星“月球 19 号”进行的测量证实了这一假设，纳扎罗娃及其同事的报告证实了这一点。⁹⁰ 这些测量结果落在近地卫星数据范围内，例如休斯的研究结果。⁹¹ 因此，似乎没有理由怀疑卫星测量结果总体上适用于月球陨石尘埃输入量。由于 Nazarova 等人的 Luna 19 测量结果与 Hughes 的近地卫星数据累积通量图相符，因此 Hughes 对地球陨石尘埃流入量的估计同样适用于月球，只是当考虑 Dohnanyi 概述和使用的相关聚焦因子时，^{我们}根据该卫星数据（通过标准累积通量计算方法）得到的月球陨石尘埃流入量估计值是地球的一半，即每年约 8,000–9,000 吨。

月球微陨石坑

除了利用各种技术和探测器进行卫星测量，直接测量地月系统中陨石尘埃的输入量之外，另一种用于估算月球陨石尘埃输入量的主要直接探测技术是研究月球表面裸露岩石上的微陨石坑。从陨石坑的大小来看，月球表面显然曾受到大型陨石的撞击，但实际上，月球表面存在各种大小的陨石坑，甚至包括微米级的。关键因素在于陨石颗粒的撞击速度（无论其大小），

以及月球上缺乏大气层来减缓（或燃烧）陨石的速度。因此，只要质量足够大，即使是最小的尘埃颗粒，撞击裸露的岩石表面也会形成微陨石坑，就像它们撞击航天器舷窗时一样（研究卫星舷窗上的微陨石坑是卫星测量技术之一）。此外，月球上没有大气层，加上月球表面没有水，这意味着我们在地球上经历的化学风化作用在月球上根本不会发生。当然，物理侵蚀仍然存在，这同样是由于各种大小和质量的陨石撞击以及太阳风粒子造成的，但这些过程也因阿波罗登月计划而得到了研究。然而，目前人们主要利用月球岩石中的微陨石坑来估算月球尘埃的输入量。

或许最早尝试利用月球表面的微陨石坑来确定月球陨石尘埃输入量的，是^{93岁的}杰夫（Jaffe）所做的。他对比了“勘测者3号”和31个月后“阿波罗12号”宇航员拍摄的月球表面照片。“勘测者3号”探测器于1967年4月20日至5月3日期间向地球传回了数千张月球表面的电视照片。随后，1969年11月20日，“阿波罗12号”宇航员造访了同一地点，并用手持相机拍摄了照片。除了宇航员对表面尘埃造成的明显扰动痕迹外，杰夫只发现了一处明显的表面变化。在“勘测者3号”着陆时，其中一个着陆垫弹跳留下的印记底部，所有相关的阿波罗照片都显示有一个直径约2毫米的颗粒，而这个颗粒在任何一张“勘测者3号”

的照片中都没有出现。经过仔细分析，他得出结论：该颗粒是在“勘测者”号拍摄照片之后才出现的。此外，由于照片的分辨率很高，任何直径达 1.5 毫米的陨石坑都应该能在阿波罗照片中清晰可见。虽然照片中发现了两个凹坑以及其他颗粒，但由于它们出现在两张照片上，因此必定是在“勘测者”号着陆时形成的。因此，贾菲得出结论：在 31 个月的时间里，直径 20 厘米的印痕底部没有出现过直径达 1.5 毫米的陨石坑，所以陨石撞击率低于每平方米每月 1 个颗粒。这相当于每平方米每秒 4×10^{-7} 个颗粒的通量，^{颗粒质量}
 3×10^{-8} 克，这一速率接近根据航天器测量得出的陨石尘埃通量的下限，并且比之前的一些估计值低几个数量级。他得出结论，勘测者 3 号着陆器着陆点的印痕中没有可探测到的陨石坑，这意味着月球表面的陨石尘埃流入量非常低。

随着阿波罗宇航员对月球表面进行采样并将岩石样本带回地球，人们开始关注裸露岩石表面上大量存在的微陨石坑，将其作为计算陨石尘埃输入量的另一种方法。这些微陨石坑的直径从小于 1 微米到大于 1 厘米不等，它们在裸露的月球岩石表面上的普遍存在表明，微陨石坑的形成几乎影响了月球表面的每一平方厘米。然而，为了将微陨石坑的量化描述数据转化为星际尘埃颗粒及其输入速率的数据，必须对月球微陨石坑的

直径和形成这些陨石坑的撞击颗粒的质量进行校准。Hartung 等人⁹⁴指出，可以使用几种利用实验室陨石坑实验结果的方法，但他们最终选择了两种基于微粒加速器实验的方法。由于对于任何给定的粒子直径，撞击坑的直径与撞击速度成正比，因此校准程序采用恒定的撞击速度，该速度设定为 20 公里/秒。此外，选择该数值是因为基于目视和雷达流星观测的星际尘埃或流星体的速度分布受限于地球和太阳系的逃逸速度，并在约 20 公里/秒处达到最大值，因此通常认为这是流星体的平均速度。撞击月球的粒子可能具有 2.4 公里/秒的最小速度（即月球逃逸速度），但由于月球对速度较慢的粒子的有效截面相对较小，预计平均速度仍接近 20 公里/秒。微米级流星体的飞行速度测量结果通常与此分布一致。因此，使用 20 公里/秒的恒定撞击速度可以建立撞击粒子直径与微撞击坑直径之间的校准关系。假设密度为 3g/cm^3 ，则可以建立微坑直径与撞击粒子质量之间的校准关系。

在确定微流星体的相对质量后，可以通过将岩石表面微陨石坑的面密度与这些岩石样本的表面暴露时间关联起来，来获得它们在月球表面的通量。换句话说，为了将给定样本上的陨石坑数量转换为行星际尘埃通量，必须知道样本在月球表面的停留时间。

⁹⁵这些在月球表面的停留时间，或表面暴露

时间，可以通过宇宙成因铝²⁶放射性测量或宇宙射线径迹密度测量来确定，⁹⁶或者更常见的是通过太阳耀斑粒子径迹密度测量来确定。

⁹⁷

基于此，Hartung 等人⁹⁸得出结论：据推测，过去一百万年间，月球表面质量为 25 微克及以上的颗粒的平均最小通量为每年每平方厘米 2.5×10^{-6} 个颗粒；并且，仅基于月球数据得出的质量范围为

10^{-12} 至 10^{-4} 克的最小累积通量曲线，比独立推导出的卫星探测器实验的现代通量数据低一个数量级。此外，他们发现质量为 10^{-7} 至 10^{-4} 克的颗粒是星际尘埃颗粒横截面积的主要贡献者，并且这些颗粒是微陨石坑叠加导致新鲜月球岩石表面暴露的主要原因。他们还提出，撞击作用沉积在月球表面的绝大部分能量是由质量为 10^{-6} 至 10^{-2} 克的颗粒传递的。

许多其他研究也针对月球表面岩石样本上的微陨石坑进行了分析，并据此计算了进入月球的陨石尘埃（微流星体）数量。例如，Fechtig 等人利用光学显微镜和扫描电子显微镜（SEM）技术，对特定样本的²平方厘米区域进行了详细研究。他们通过光学方法测量并计数了微陨石坑，并将结果绘制成图表，以展示微陨

石坑直径与累积陨石坑频率之间的关系。与其他研究者一样，他们发现，在所有直径为 100-200 微米的大型微陨石坑中，平均包含一到两个直径约为 1 微米的“小型”微陨石坑；而在所有“大型”微陨石坑（直径为 200-1000 微米，几乎所有月球岩石上都存在大量此类微陨石坑）中，则包含大量此类“小型”微陨石坑。研究发现，统计“较大”微坑内的“较小”微坑数量对于估算微坑的总体形成率以及形成微坑的颗粒尺寸和质量分布具有统计学意义。这是因为，假设撞击颗粒的尺寸或能量分布随时间保持不变，那么大坑与小坑重叠导致小坑无法观测到的概率，与小坑与大坑重叠导致小坑可以观测到的概率相等。换句话说，在随机形成过程中，平均而言，对于每个在较大微坑内可观测到的小坑，必然存在一个因较大微坑的形成而无法观测到的小坑。因此，他们认为有必要向上修正观测到的小坑数量，以弥补这种影响。使用 2 的校正因子¹⁰⁰ 他们发现得到的微坑尺寸分布图与 Schneider 等人在另一个样本中发现的微坑尺寸分布图吻合良好。100 他们对其他样本上的微坑进行测量和计数，也得到了与其他研究人员在其他样本上报告的尺寸分布相似的尺寸分布。

Fechtig 等人还进行了实验室模拟实验，以校准微陨石坑尺寸与撞击粒子尺寸、质量和能量之间的关系。

一旦根据这些信息计算出给定区域的累积微陨石坑数量，就可以通过将累积微陨石坑数量除以先前通过太阳耀斑径迹密度测量确定的样本暴露年龄，轻松计算出该区域的每秒累积流星体通量。由此，他们计算出月球上的累积流星体通量为 $4 (\pm 3) \times 10^{-5} \text{ 个}^{\text{粒子}} \text{ m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ，他们认为这与卫星原位测量结果相当吻合。图⁵重现了他们绘制的图表，该图表比较了从月球微陨石坑测量中得出的微流星体通量与从各种卫星实验中获得的通量（即，在粒子质量范围内每平方米每秒的累积粒子数）。

Mandeville¹⁰¹ 采用类似的方法研究了阿波罗 15 号着陆点采集的角砾岩样本中的微陨石坑。他们统计了陨石坑的数量并测量了其直径。通过实验推导出了校准曲线，以关联撞击速度和微陨石坑直径，以及撞击粒子的质量和微陨石坑直径。太阳耀斑径迹密度低，表明暴露时间较短且近期，微陨石坑密度低也印证了这一点。因此，在计算累积微流星体通量时，他们假设暴露时间为 3000 年，这是基于测得的太阳耀斑径迹密度和假设的太阳径迹生成率。对于质量大于 $2.5 \times 10^{-10} \text{ g}$ 的粒子，在 20 km/s 的撞击速度下，最终得到的累积粒子通量为 $1.4 \times 10^{-5} \text{ 个粒子/平方米/秒}$ 。该值与卫星测量得到的通量值非常接近，但处于 Fechtig 等人根据微陨石坑计算出的累积通量曲线的下限。

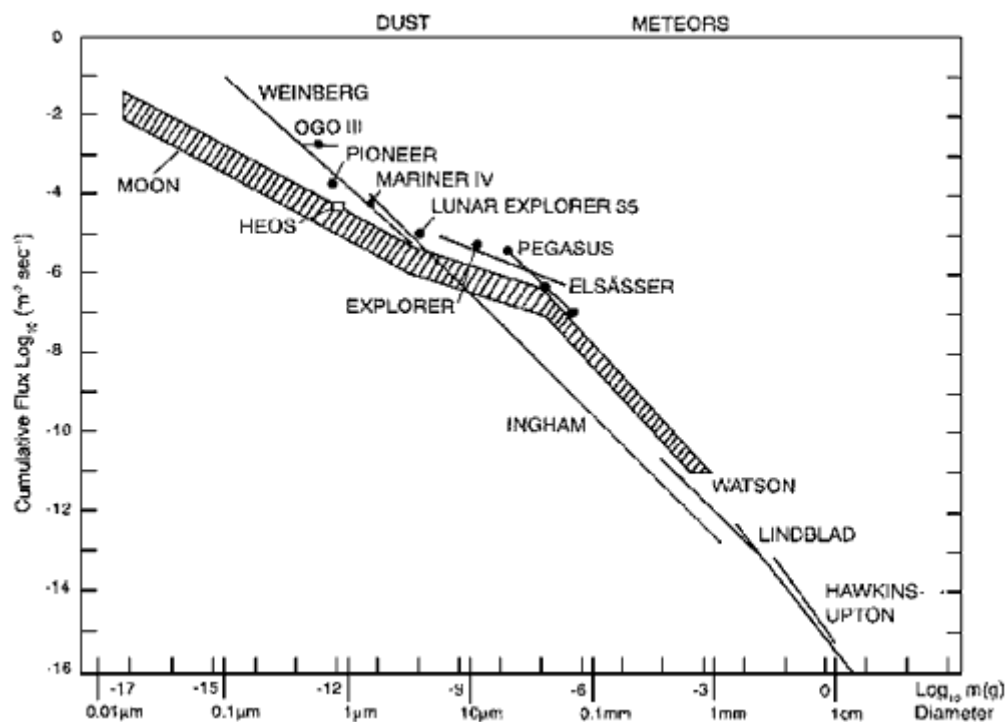


图 5. 月球微陨石坑测量得到的微流星体通量（交叉阴影线并标记为“MOON”）与各种卫星原位实验获得的微流星体通量的比较（改编自 Fechtig 等人 99^[102]）。质量/尺寸范围已细分为尘埃和流星。

未解决的问题

Schneider 等人^[102]也采用了相同的方法研究了阿波罗 15 号和 16 号任务以及月球 16 号任务的样本中的微陨石坑。在对微陨石坑进行计数和测量并进行校准实验后，他们利用光学显微镜和扫描电子显微镜确定了太阳耀斑径迹密度，并推导出了太阳耀斑暴露年龄。他们将最终得到的累积陨石尘埃通量绘制在通量-质量图上（如图 5 所示），而不是对其进行量化。然而，他们的累积通量曲线与其他研究者（例如 Hartung 等人^[103]）的结果接近。尽管如此，他

们还是对微陨石坑数据及其推导提出了一些重要的质疑，因为他们发现基于月球微陨石坑研究的通量值通常低于基于卫星探测器直接测量的通量值，这一点在图 5 中也有体现。他们发现这种差异难以解释，可能由一个或多个因素造成。他们首先列出的因素是太阳耀斑轨迹法中可能存在的系统误差，这或许与我们目前对太阳耀斑粒子通量的认知有关。事实上，由于在诸如“勘测者 3 号”探测器等时间控制主导的观测中，应用从太阳耀斑轨迹记录中推导出的太阳耀斑通量存在不确定性，他们得出结论，这意味着这些探测器测得的太阳耀斑暴露年龄系统性地偏低了两到三倍。具有讽刺意味的是，这意味着计算出的微陨石坑累积尘埃通量系统性地偏高了相同的倍数，这意味着月球微陨石坑研究的通量值与卫星探测器直接测量值之间的差异会更大。然而，他们认为，部分系统性差异可能是由于卫星探测器记录到的通量增强，这是由于各种大小的陨石撞击月球表面喷射出的粒子造成的。无论如何，他们认为，部分系统性差异可能与月球微陨石坑和卫星探测器的校准有关。此外，由于我们只能测量当前的通量，例如通过卫星探测器，因此它实际上可能高于长期平均值，而他们认为长期平均值是从月球微陨石坑数据中得出的。

Morrison 和 Zinner¹⁰⁴也对太阳耀斑轨迹密度测量和推导出的暴露年龄提出了疑问。他们研究了阿波罗 17 号着陆区的样本，对已知其在月球表面原始方向的岩石样本表面的微流星体进行了计数和测量，从而确定了它们的暴露历史，以检验微流星体通量和太阳耀斑粒子是否存在方向性变化。测量完成后，他们将自己的太阳耀斑轨迹密度与深度剖面图与其他研究人员在其他样本上测得的剖面图进行了比较，发现曲线的陡峭程度以及它们相对于轨迹密度和深度值的相对位置存在差异。他们发现曲线陡峭程度的差异与假定的暴露年龄的差异并不相关，因此，尽管他们不能排除这些反映太阳活动变化的真实斜率差异，但更有可能的是，这些差异源于观测技术的差异、深度测量的不确定性、侵蚀、样本上的尘埃覆盖和/或所测不同样本的精确月球表面暴露几何形状。他们随后指出，证据似乎更有利于那些斜率较平缓的曲线（轨道密度与深度剖面图），尽管这一结论值得商榷，因为即使他们自己也承认，那些斜率较平缓的剖面图与 Surveyor 3 的剖面数据并不匹配。

Morrison 和 Zinner 没有计算单一的累积通量值，而是将较小的微陨石坑与较大的微陨石坑分开处理，并给出了每平方厘米每年约 900 个直径为 0.1 微米的陨石坑和每年每平方厘米约 $10^{-15} \times 10^{-6}$ 个^{直径}为

500 微米或更大的陨石坑的通量。他们发现，这些通量与暴露的岩石表面相对于月球天空的指向无关，因此这反映出微陨石通量在方向上没有变化。这些通量似乎也与样本的假定暴露时间无关。他们还提出，微陨石坑数量与太阳耀斑粒子径迹密度的比值可以作为比较不同实验室/研究人员在不同采样条件下通量结果的便捷指标。将他们数据中的这些比率与其他研究的结果进行比较后发现，其他一些研究者的比率比他们的低 50 倍之多，这不禁让人对微陨石坑数据是否能准确反映月球陨石尘埃的输入量产生严重质疑。然而，问题不在于微陨石坑本身，而在于确定/估算岩石年龄及其暴露时间时所涉及的基本假设。

另一项相关研究是 Cour-Palais 进行的
¹⁰⁵，他检查了阿波罗 7 号至 17 号（不包括阿波罗 11 号）飞船指令舱的隔热罩窗口，以寻找流星体撞击痕迹，从而估算星际尘埃通量。作为研究的一部分，他还将结果与勘测者 3 号月球着陆器电视罩获得的数据进行了比较。在每种情况下，曝光时间都是已知的，这消除了研究月球岩石样本上的微陨石坑时，曝光时间估算中固有的不确定性和假设。此外，阿波罗飞船的结果代表了与卫星载探测器技术非常相似的行星空间测量，而勘测者 3 号电视罩则代表了月球表面探测器。最终，Cour-Palais 在阿波罗

飞船的窗口上发现了 10 个大小不一的微陨石坑。为了进行校准测试，研究人员用不同直径和质量的微粒撞击这些窗口，并利用测试结果绘制了微陨石坑直径与撞击微陨石估计质量之间的校准曲线。由于阿波罗飞船曾在地球轨道和月球轨道上停留过一段时间，并在地月星际空间中飞行，因此必须应用修正因子，才能将阿波罗窗口数据作为一个整体来代表星际空间的测量结果。同样，他也对“勘测者 3 号”电视遮光罩的测量结果应用了修正因子，以便将阿波罗数据得到的累积质量通量分布与卫星载探测器系统获得的结果进行比较，结果表明两者吻合良好。

他得出结论，这些结果代表了目前地球引力影响范围之外质量小于 10^{-7} 克的微流星体的平均通量。然而，他指出，代表当前尘埃通量的卫星探测器测量值比月球微陨石坑记录的通量高一个数量级，而后者被解释为“^{史前}”通量。另一方面，他修正了“勘测者 3 号”的结果，以消除月球引力的影响，使其与卫星探测器对行星际尘埃通量的测量结果相一致。但如果将“勘测者 3 号”的结果视为月球表面的通量，那么该通量目前比阿波罗飞船在行星际空间记录的通量低一个数量级。无论如何，这些飞船测量的撞击坑数量如此之少，以至于人们不禁要问，这些结果的统计代表性究竟如何。事实上，考虑到卫星搭载的探测器系统规模，

人们同样可以质疑这些探测器的结果在多大程度上能够代表浩瀚的行星际空间。

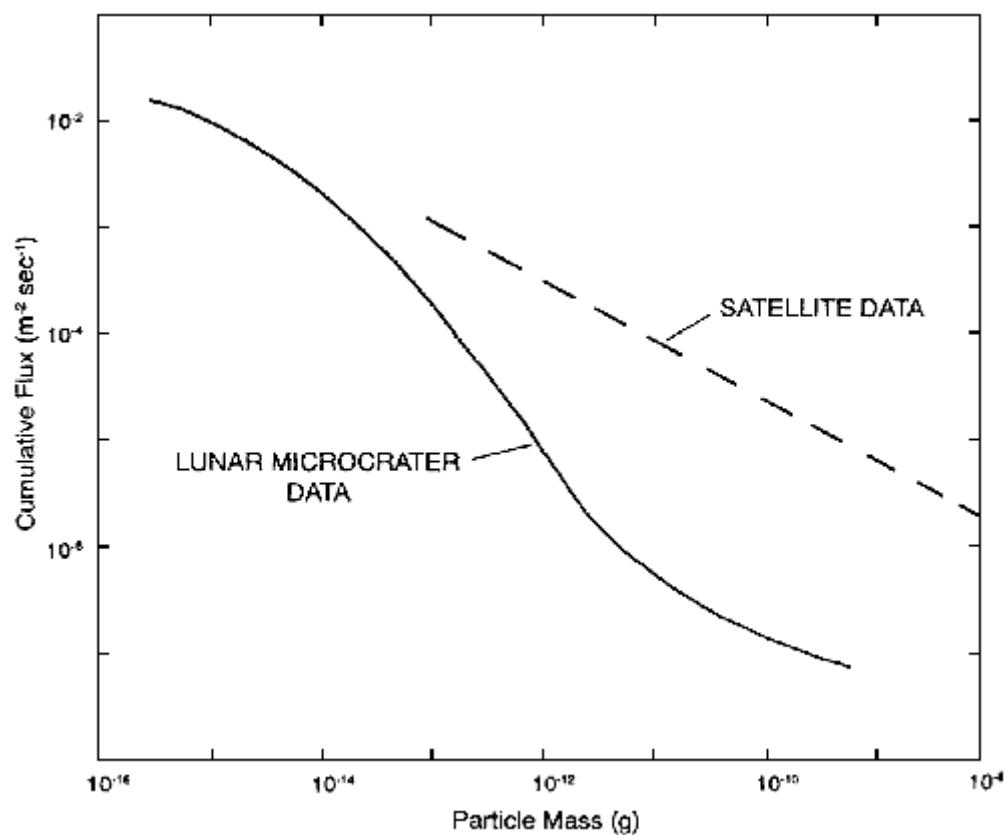


图 6. 根据卫星和月球微陨石坑数据得出的累积通量（质量大于给定质量的微流星体数量，每秒撞击距离太阳一个天文单位的暴露表面上的每平方米的微流星体数量）（改编自 Hughes¹⁰⁶）。

其他人也注意到了月球微陨石坑数据与卫星数据之间的这种差异。例如，休斯报告说，这种差异“多年来”一直为人所知。¹⁰⁶他用图表来说明这种差异，如图 6 所示。他重点指出了这些测量微流星体流入的技术中存在的一些问题。例如，他报告说，新的证据表明，流星体的撞击速度约为 5 公里/秒，而不是之前

假设的 20 公里/秒。他认为，考虑到这一点，图 6 中的曲线只会向右移动，移动的幅度取决于麦克风响应和穿透孔尺寸（对于卫星探测器）对速度的依赖性，以及陨石坑直径（对于月球微陨石坑），但由于这些影响仅仅是流星体动量或动能的函数，因此即使使用它们来调整数据，仍然不足以使图 6 中的曲线重合（即，克服两组数据之间的这种差异）。此外，关于月球微陨石坑数据，休斯指出，还有两个假设，即……微陨石坑直径与撞击粒子直径之比基本恒定在 2，粒子密度为 3 克/立方厘米，但鉴于实验室实验表明该比值随粒子密度降低而减小，且粒子密度随质量变化，因此需要重新考虑。他认为，这两个因素都增加了对微陨石坑的解读难度，但“主要问题”在于估算^所研究岩石在月球表面暴露的时间。事实上，他指出，计算暴露年龄的关键假设——即太阳活动在过去保持不变——才是“真正的绊脚石”：过去的粒子通量可能较低，或者太阳耀斑通量可能较高。他认为，由于实验室模拟表明太阳风溅射侵蚀是决定微陨石坑寿命的主要因素，因此，了解这一点后，只需考虑微陨石坑分布平衡的岩石表面，即可推导出微陨石体的流入量。他总结道，这项研究表明，微陨石体的流入量……据称，在过去的 10 万年中，月球微陨石坑的流量增加了四倍，这可以解释月球微陨石坑数据和卫星数据之间的差异，如图 6 中两条曲线的分离所示。然而，休

斯认为，这种“解释”又“引出了一个问题，即为什么月球微陨石坑的流量会增加”，而这个问题似乎仍未得到解决。

在一篇回顾月球微陨石坑数据和月球微流星体通量估算的论文中，Hörz 等人¹⁰⁷讨论了他们详细总结的由不同研究者通过月球样本分析得出的微流星体通量数据中出现的一些关键问题。首先，微流星体的方向分布极其不均匀，地球顶点方向和反顶点方向的流星体通量相差约三个数量级。由于月球可能主要仅从顶点方向收集大于 10^{12} 克的粒子，因此他们认为，为了与沿顶点方向采集的卫星数据进行比较，根据月球微陨石坑统计数据得出的通量可能需要增加 p 倍。另一方面，由于假定通量是各向同性的，指向顶点的卫星数据通常已被向上修正，因此实际的各向异性导致了通量的高估，从而使卫星结果看起来像是通量的上限。第二，沿顶点方向入射的微流星体平均撞击速度似乎只有 8 公里/秒，而根据月球微陨石坑计算的通量假设标准撞击速度为 20 公里/秒。因此，如果进行修正，则形成任何给定微陨石坑所需的弹体质量将会增加，因此，质量大于 10^{-10} 克的月球微流星体通量^将有效增加约 5 倍。第三，质量小于 10^{-12} 克的粒子通常具有至少 50 公里/秒的相对速度，而这些质量的月球通量曲线同样基于 20 公里/

秒的撞击速度。因此，如果进行适当的修正，月球累积微流星体通量曲线将向较小质量方向移动，移动幅度可能高达 10 倍。尽管如此，Hörz 等人得出结论：

“因此，如果考虑上述速度和方向分布的不确定性，从月球陨石坑统计数据得出的通量与卫星直接测量结果在数量级上是一致的。”

尽管这些评论出现在 1975 年发表的一篇综述论文中，但首页的脚注表明，该论文是在 1973 年的一次科学会议上发表的，而这三位研究人员在同一会议上还发表了另一篇论文，其中提出了一些相关的补充评论。在那篇论文以及之前的一篇论文中，Gault、Hörz 和 Hartung^{108, 109} 都提出了他们认为基于对最可靠卫星测量数据的解读而得出的累积陨石尘埃通量的“最佳”估计值。他们将这个“最佳”估计值用数学形式表达为：

$$N = 1.45 m^{-0.47} 10^{-13} < m < 10^{-7},$$

$$N = 9.14 \times 10^{-6} m^{-1.213} 10^{-7} < m < 10^3。$$

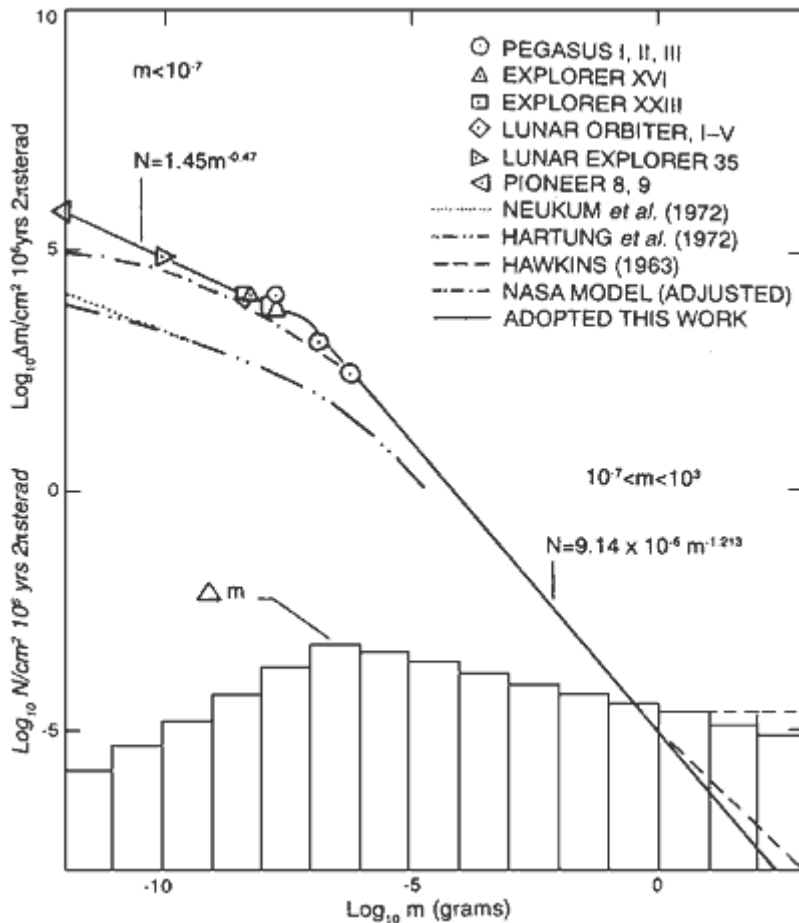


图 7. 选取用于确定质量通量分布的航天器实验的微流星体通量测量结果（改编自 Gault 等人¹⁰⁹）。图中还显示了每十倍质量质量(m)内的增量质量通量，总和约为每年 10,000 吨。他们使用的数据来源列于其参考文献中。

他们指出，使用两个这样的指数表达式及其产生的间断点是对通量的一种人为表示，并非旨在表示真实的间断点，而是为了简化数学运算和方便计算。他们还绘制了由这两个指数表达式表示的累积通量，以及每个粒子质量十倍数的增量质量通量，该图如图 7 所示。需要注意的是，他们的通量曲线基于他们认为最可靠

的卫星测量数据。此外，正如他们所指出的，从月球岩石（微陨石坑数据）推导出的通量“*不一定能与当前的卫星或流星照片数据直接比较*”。¹¹⁰

然而，利用图 7 所示的累积通量曲线和增量质量通量的直方图，可以估算（例如，通过将每个增量质量通量相加）累积质量通量，其约为 $2 \times 10^{-9} \text{ gcm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，或约 10,000 吨/年。这与他们在结论性意见中提到的估计值相同：

*“我们注意到，目前地球-月球系统正在吸收的、对任何增强过程都起增强作用的物质质量，每年约为 10^1 吨。”*¹¹¹

他们通过对“最可靠的卫星测量数据”进行数学建模，得出了这一“最佳”估计通量，但他们在同一篇论文中随后的评论似乎相当矛盾：

“如果我们沿着这个思路来思考，那么基本问题就简化为对“最佳”估计通量有效性的考量，这对于微流星体研究领域来说并不陌生，而且历史上也存在相当大的争议。我们在此仅指出，尽管来自特定卫星的特定数据集可能由于各种原因存在误差，但我们发现用于定义“最佳”通量的各种航天器实验之间的相关性非常令人信服，尤其是在考虑到用于探测和测量通量

的不同技术时。此外，必须记住，主要受微克级质量影响的磨损率几乎完全取决于卫星数据，而仅受毫克级质量影响的破裂时间则完全取决于对流星质量的摄影测定。要解释来自两种完全不同且独立的技术的通量为何会存在如此相似的误差，实在令人费解。但如果它们确实存在误差，那么误差在于数值过高，而由此推导出的通量则来自卫星数据。月球岩石更能准确地描述当前近地微流星体的通量。”

（原文强调）¹¹²

人们不禁要问，他们一方面强调月球微陨石坑数据能更准确地描述当前的微流星体通量，另一方面却又基于“最可靠的卫星测量”得出“最佳”通量估算值，这该如何解释？然而，他们的结论颇具启发性。当然，之所以如此强调月球微陨石坑数据，是因为他们相信这些数据记录了月球数十亿年历史中累积的通量，从表面上看，这似乎比短暂的卫星探测器点测量更具统计可靠性。然而，正如前文所述，他们仍然面临着微陨石坑数据与卫星测量之间尚未解决的差异。因此，他们解释说，微陨石坑数据呈现的是“史前”通量，而从月球岩石中推导出的通量则基于太阳耀斑径迹密度测量值推导出的暴露年龄以及对过去太阳耀斑活动的假设。至于 Gault 等人使用的月球微陨石坑数据，他们指出，推导出的通量是基于 2500 至 70 万年的暴

露年龄，这给他们留下了一个相当耐人寻味的谜团。如果卫星测量显示的当前通量比代表“史前”通量的微陨石坑数据高一个数量级，那么陨石尘埃的通量在近期必然有所增加或增强。但他们不得不承认，

“如果这些年龄被普遍接受，那么将 10 倍的增强系数纳入长期平均值，就能将增强的开始和持续时间限制在过去的几十年内。”

他们指出，暴露年龄和增强幅度当然都存在不确定性，但真正的问题是这种增强的粒子通量的来源，这个问题他们并未解答，而是作为未来研究的主题。另一方面，如果暴露年龄过长而不被接受，那么微坑数据可以很容易地与“更可靠的卫星测量结果”相吻合。

其他技术

似乎只有另外两种微流星体和流星涌入量的测量技术被尝试过。其中之一是阿波罗 17 号月球喷射物和微陨石实验，这是阿波罗 17 号宇航员部署的一种专门用于探测微陨石的装置。¹¹³它由一个装有监测设备的盒子组成，其外壳对撞击的尘埃颗粒非常敏感。显然，它不仅能够计数尘埃颗粒，还能测量它们的质量和速度，其目的是确定每年撞击月球表面的特定尺寸范围内微粒数量的精确上限。然而，这些结果似乎

并没有为微陨石坑研究已经建立的庞大数据库增添新的数据。

另一种直接测量技术是被动地震实验，阿波罗宇航员在该实验中部署了一台地震仪，用于记录后续的撞击事件。¹¹⁴然而，在这种情况下，撞击月球表面的陨石颗粒大小和质量都在克到千克范围内，其撞击力足以引起地震仪记录到的振动。每年记录到的陨石撞击事件在 70 到 150 次之间，质量范围为 100 克到 1000 千克，这意味着陨石通量为

$$\log N = -1.62 - 1.16 \log m,$$

其中 N 为每年每平方公里撞击月球表面的天体数量，质量大于 m 克。¹¹⁵该通量比微陨石坑数据的平均积分通量低约一个数量级。然而，本实验收集的数据已用于构建累积通量曲线（例如，再次参见图 2）并估算累积质量通量，从而涵盖了该粒子质量范围。

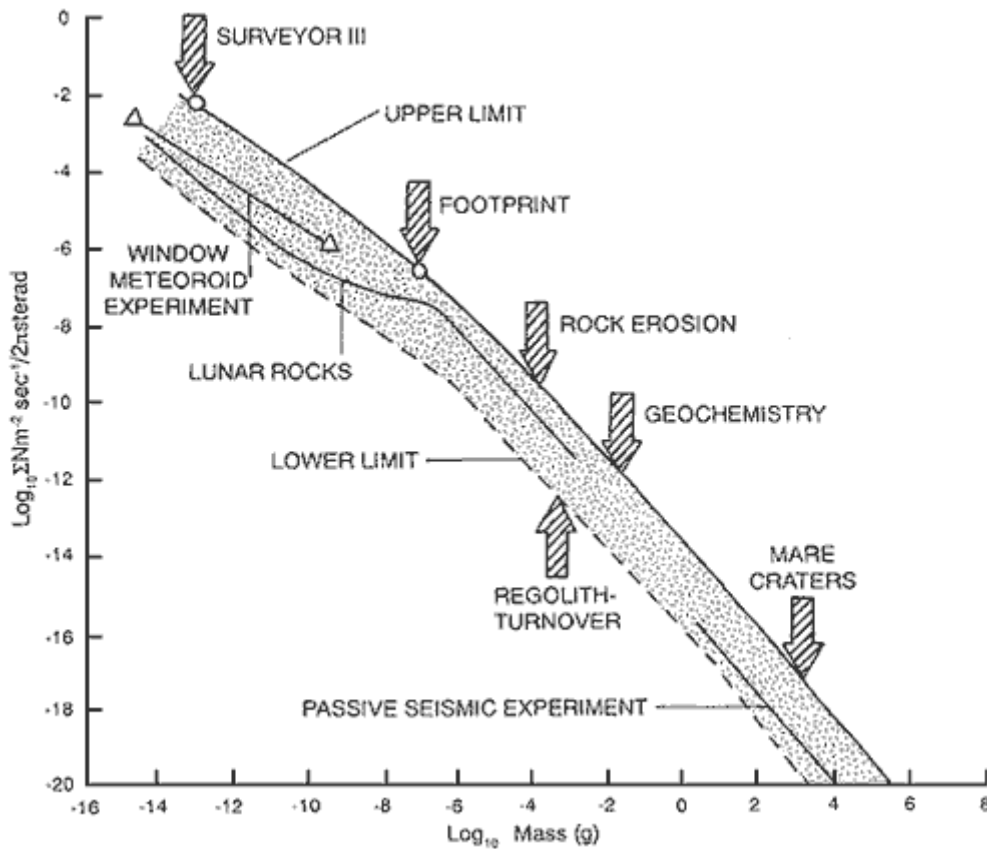


图 8. 根据各种独立的月球研究对微流星体和较大物体的通量进行约束（改编自 Hörz 等人¹⁰⁷）

结论

Hörz 等人总结了多项独立月球研究得出的关于月球微流星体和较大天体通量的基本约束条件。¹¹⁶他们还绘制了受这些约束条件限制的累积通量曲线范围

（见图 8）。其中包括被动地震实验的结果以及航天器窗口直接测量的微流星体数据。他们认为，可以通过月海撞击率、月岩侵蚀率和其他撞击数据推导出通量的上限。同样，勘测者 3 号相机镜头上的阴性结果以及勘测者 3 号着陆装置着陆垫的完美保存（以上均已提及）也定义了通量的上限。另一方面，下限值来

源于对月壤中太阳和银河辐射径迹的研究。人们认为，月壤仅受到微陨石的改造，因此，由于假定的长期未受扰动，其通量不可能显著低于所示值。地球化学证据也基于对月壤的研究，其中微量元素的丰度可以指示陨石污染的类型和数量。Hörz 等人指出，严格来说，只有被动地震仪、阿波罗窗口和月海陨石坑才能提供累积质量分布。所有其他参数要么是陨石质量或能量的总体测量值，相应的“通量”是通过从月球微陨石坑研究（图 8 中的“月球岩石”）获得的微分质量分布计算得出的。因此，图 8 中的相应箭头可以沿着定义“上限”和“下限”的线任意移动。另一方面，他们指出 Surveyor 3 相机镜头和脚垫分析只能定义点。

科学家（年份）	技术	流入量估算（吨/年）
哈特曼（1983）	根据对地球物质流入量的估算计算得出。	4, 000
Keays 等人（1970）	月壤和月岩的地球化学特征	15, 200

Ganapathy 等人 (1970)	月壤和月岩的地球化学特征	19, 900
多赫纳尼 (1971, 1972)	根据卫星、雷达数据计算得出	10, 450
Nazarova 等人 (1973)	月球轨道卫星数据	8, 000 – 9, 000
与休斯 (1975) 相比	根据卫星、雷达数据计算得出	(4, 000 – 15, 000)
Gault 等人 (1972, 1973)	结合月球微陨石坑和卫星数据	10, 000

表 4. 月球陨石尘埃流入量估算汇总。

表 4 总结了不同的月球陨石尘埃估算值。由于 Hörz 等人的图表（图 8）中累积通量轴的单位与 Gault 等人的累积通量和累积质量图（他们据此估算出每年约 1 万吨的月球陨石尘埃输入量）中相同轴的单位明显不同，因此很难根据该图表估算累积质量通量。Hörz 等人的基本约束图似乎部分取自他们论文中的前一幅图，

该图包含了 Gault 等人图表（此处为图 7）中使用的一些微陨石坑数据，而 Gault 等人正是根据这些数据计算出了每年 1 万吨的通量估算值。假设两幅累积通量图（此处为图 7 和图 8）所用单位的基本差异仅仅是两个对数刻度中相对数值的不同，那么 Gault 等人的累积通量曲线应该落在 Hörz 等人月球累积通量汇总图（此处为图 8）的上下限之间的某个范围内，即在基本约束条件下。因此，根据 Hörz 等人的月球累积通量曲线估算的通量值可能仍然会围绕 Gault 等人估算的每年 10,000 吨左右。

综上所述，现有证据表明，月球陨石尘埃的年输入量约为 1 万吨。这似乎是一个合理的近似估计，可从 Hörz 等人的研究中得出。他们通过仔细分析各种技术获得的大量数据，对月球的累积通量进行了限制。即便如此，正如我们所见，Gault 等人对他们所采用的主要测量技术的一些基本假设提出了质疑——特别是月球微陨石坑数据和卫星测量数据。与“地球化学”估算一样，微陨石坑数据依赖于均变论的年龄假设，包括太阳耀斑的发生频率；与卫星数据一样，微陨石坑数据也依赖于均变论的年龄假设，即星际空间中尘埃的持续存在以及向月球的输入量。他们声称过去累积尘埃输入量存在变化，但这些说法也依赖于均变论的年龄假设，因此这种论证可能被认为是循环论证。然而，

撇开抽样统计和代表性问题不谈，文献中主要基于当今卫星载探测器测量结果，对每年约 10,000 吨的数字进行了强有力的辩护。

最后，范·蒂尔等人¹¹⁷估算的月球每年约 500 吨的尘埃积累速率令人颇感困惑。 在他们论述“月尘争议”时，他们对神创论者及其对现有文献数据的处理方式进行了相当严厉的批评。例如，他们指出：

“未能考虑与所讨论主题相关的已发表数据，显然违背了专业科学应当具备的严谨性和诚信准则。”¹¹⁸

再说一遍：

“年轻地球论者持续发表这些言论，是对自然科学家职业操守标准的不可容忍的践踏。”¹¹⁹

既然范·蒂尔及其同事准备发表如此尖锐的评论，人们原本会期望他们在处理他们声称仔细查阅过的科学文献时会更加谨慎。然而事实并非如此，因为他们没有将自己计算出的每年 500 吨月尘流入量与我们在同一文献中看到的估算值进行核对。这些估算值基于范·蒂尔等人参考的部分卫星测量数据，以及他们未参考的微陨石坑数据。但这还不是全部——他们也没有核对用于计算月球尘埃积累率的系数，这些系数是

根据他们从文献中得出的地球尘埃积累率计算出来的。如果他们参考了例如多赫纳尼（Dohnanyi）的研究（正如我们已经看到的），他们就会意识到，他们只需要使用 2 的聚焦系数，因为月球较小的表面积显然无关紧要。这真是缺乏严谨性！如果他们认真查阅了相关文献，那么他们就不得不同意这里的结论，即每年流入月球的尘埃量约为 10,000 吨。

阿波罗计划之前的月尘厚度估算

第二个需要解决的主要问题是，美国宇航局是否真的预料到宇航员在 1969 年 7 月 20 日登陆月球时会发现厚厚的尘埃层。许多人断言，由于佩特森等人曾在阿波罗登月计划之前对陨石尘埃的涌入量进行过估算，美国宇航局之所以谨慎，是担心月球上真的存在厚厚的尘埃层，导致登月舱和宇航员沉入其中。

早期推测

阿西莫夫无疑是当时一位经常被引用的权威人士。他根据彼得森估算的每年 1430 万吨尘埃，自行计算了月球上的尘埃量，并评论道：

“但是月球呢？它和我们一起在太空中运行，虽然它体积更小，引力也更弱，但它也应该会收集到相当数量的微陨石。

诚然，月球没有大气层来摩擦微陨石使其变成

尘埃，但撞击月球表面产生的热量应该足以完成这项工作。

现在，各种证据表明，月球（或者至少是平坦的低洼地带）表面覆盖着一层尘埃。然而，没有人确切知道这层尘埃有多厚。

我想，如果这些尘埃是坠落的微陨石扬起的尘埃，那么它的厚度可能非常大。月球上没有海洋来吞噬尘埃，没有风来扰动它，也没有生命体以任何方式破坏它。形成的尘埃只能静静地躺在那里，如果月球的尘埃量与地球相当，那么它的厚度可能达到几十英尺。

事实上，撞击陨石坑的尘埃很可能会顺着山坡滚落并聚集起来……”在底部，形成可能深达五十英尺甚至更深的“漂浮物”。为什么不呢？

因此，我脑海中浮现出这样一幅画面：第一艘宇宙飞船，挑选了一块平坦的着陆点，缓缓尾部朝下俯冲……然后雄伟地沉入海底，消失在视线之外。”¹²⁰

阿西莫夫当然不是第一个推测月球尘埃厚度的人。早在 1897 年，皮尔¹²¹号就曾推测月球尘埃的厚度，因为“众所周知，地球上会有大量陨石尘埃落下”。然而，他显然认为月球上只有“一层极薄的尘埃”。1930 年至 1950 年间，人们发表了几项关于陨石坠落地球速率的估算，这些估算均基于对流星和陨石坠落的目视观

测。这些估算值从每年 26 吨到每年 45000 吨不等。

¹²² 1956 年, Öpik ¹²³ 估计每年有 25,000 吨尘埃落到地球上; 同年, Watson ¹²⁴ 估计总累积率为每年 300,000 至 300 万吨; 1959 年, Whipple ¹²⁵ 估计为每年 700,000 吨。

然而, 天文学家在估算月球表面尘埃厚度时, 关注的不仅仅是陨石尘埃落到月球表面的问题, 因为月球上第二个粉状物质来源是裸露岩石经各种过程的侵蚀。月球陨石坑无疑是月球上最引人注目的特征之一, 最初天文学家认为火山活动是造成陨石坑的原因, 但到 1950 年左右, 大多数研究人员确信陨石撞击才是主要机制。¹²⁶ 此类撞击会粉碎大量岩石, 并将碎片散布在月球表面。20 世纪 50 年代的天文学家一致认为, 月球表面可能覆盖着一层通过这种过程形成的粉状物质, 因为雷达研究的结果与月球表面由细小颗粒组成的结论相符, 但当时还没有有效的方法来估算其实际厚度。

1956 年, 利特尔顿提出了月球尘埃层的另一个来源。¹²⁷ 他认为, 由于月球没有大气层, 其表面直接暴露在辐射之下, 因此来自太阳的紫外线和 X 射线会缓慢侵蚀裸露的月岩表面, 将其分解成尘埃。他设想, 尘埃颗粒一旦形成, 就会保持运动状态, 缓慢地“流动”到月球表面的低洼地带, 在那里聚集形成

一层尘埃层，他认为这层尘埃层可能“厚达数英里”。利特尔顿并非孤例，英国科学界支持厚尘埃观点的主要人物是皇家格林尼治天文台的天文学家托马斯·戈尔德，他也认为覆盖月球表面的这层松散尘埃会对任何登陆月球的航天器构成严重威胁。¹²⁸ 另一方面，惠普尔则认为，月球尘埃层坚实紧密，因此人类和车辆可以轻松地在月球表面着陆和移动。¹²⁹ 另一位英国天文学家摩尔注意到戈尔德关于月海“被数公里厚的尘埃层覆盖”的理论，但他断然否定了这一观点。他评论道：

“分歧确实非常明显。一方面是戈尔德和他的支持者，他们相信月球表面覆盖着厚厚的尘埃；另一方面，像我这样的人则倾向于认为尘埃最多只有几厘米厚。彻底解决这个问题的唯一办法就是发射一枚火箭去探个究竟。”¹⁵⁰

因此，一些天文学家确实预期会发现厚厚的尘埃层，但这在天文学界远非普遍认同。当时，由于参与“太空竞赛”，俄国人自然也对这个问题很感兴趣，但他们也尚未就月尘问题达成共识。例如，沙罗诺夫

（Sharonov）¹³¹讨论了戈尔德（Gold）的理论以及支持和反对厚尘埃层的论点，并承认“这一理论已成为激烈讨论的焦点”。尽管如此，他指出“大多数月球学家”倾向于认为月海平原是由凝固的熔岩层构成，尘埃覆盖极少。

20 世纪 60 年代初期的研究

月球尘埃问题也是 1960 年 12 月在列宁格勒附近的普伊科沃天文台举行的国际天文学联合会第 14 届研讨会的议题之一。格林总结了以下论点：

赖特的偏振研究证实，月海表面覆盖着尘埃。然而，对于这层尘埃的厚度，人们提出了各种不同的估计。在迪克和贝林格等人基于射电天文学技术的模型中，假设尘埃层很薄；惠普尔则认为覆盖层厚度不足几米。

另一方面，戈尔德、吉尔瓦里和韦塞林克则倾向于认为尘埃层非常厚。……然而，由于无法证明月球表面细节存在极地均质化，因此薄尘埃层的概念似乎更为合理。……据预测，月海区域的尘埃层较薄，但在靠近月海后撞击坑的地形盆地中会增厚。¹³²

在 1961 年出版的关于月球表面的专著中，菲尔德详细讨论了月球尘埃问题，并引用了许多参与这场争论的人的观点。他讨论了月球山脉，指出“斜坡上可能经常会滞留尘埃团”，并得出结论：山脉上的平均尘埃覆盖层厚度只有一毫米左右。¹³³ 但他接着又说，

“迄今为止，所有测量都只针对月海底部物质。因此，目前还没有对月海成分的估算得到直接的实验支持。这很遗憾，因为‘月海中的尘埃有多深？’这个有趣的问题仍然没有答案。”

1964 年，一系列研究论文被汇编成一本名为《月球表面层》的专著出版，其中所有作者的共识是月球表面并不存在厚厚的尘埃层。例如，科帕尔在引言中指出：

“这层松散的尘土至少要向下延伸几厘米，可能达到一英尺左右；但在某些地方它究竟有多深，目前还只能靠推测。” ¹³⁴

在题为《月球表面的尘埃轰击》的论文中，麦克拉肯和杜宾对该主题进行了全面的回顾，包括厄皮克和惠普尔的工作，以及此后许多其他研究陨石尘埃流入地球和月球的学者的工作，但他们的结论是：

“现有关于质量小于 10^4 克的行星际尘埃颗粒通量的数据显示，如果通量保持相对稳定，那么在过去 45 亿年中，月球吸积的物质总量约为 1 克/平方厘米。” ¹³⁵

（请注意，这一说法是基于均变论对月球年龄的限制。）因此，他们接着说：

“因此，由此形成的月球表面层将由厚度为 10 厘米至 1 米的月球物质和星际物质（主要来自彗星）混合而成。小颗粒的吸积率较低，不足以造成大规模的尘埃侵蚀或在月球上形成厚厚的尘埃层。……”¹³⁶

在另一篇论文中，萨利斯伯里和斯莫利在摘要中指出：

“结论是，月球表面覆盖着一层厚度和块体大小变化极大的碎石层。碎石层之上又覆盖着一层高度多孔的尘埃层，在地形高处较薄，在低洼处较厚。尘埃层表面结构复杂，且具有显著但并不强的凝聚力。”¹³⁷

他们在结论中做出了一些预测。

因此，预计高地上粗碎石层的起伏将很大程度上被一层细尘覆盖，在近乎平坦的区域，这层细尘厚度不超过几厘米，但在陡峭的洼地中，厚度可达数米。……月尘层不会对航天器和宇航服的设计造成重大困难。……”¹³⁸

哈普克表达了相反的观点，他指出：

“近期对月球辐射热成分的分析表明，月球大片区域可能被一种密度比岩石小十倍的物质

覆盖，其厚度达数米之深。……如此厚的尘埃层与戈尔德的观点相符。” ¹³⁹

他接着说：

“因此，如果射电热分析是正确的，那么月球表面大片区域可能被厚厚的尘埃沉积物覆盖的可能性就必须认真考虑。” ¹⁴⁰

然而，次年，哈普克在一次关于月球表面性质的研讨会上报告了一项由美国宇航局资助的研究，他对尘埃问题的态度似乎更加谨慎。他在会议记录中写道：

“我相信光学证据非常有力地表明，月球表面覆盖着一层厚度未知的细尘。” ¹⁴¹

毫无疑问，NASA 一直关注月球表面尘埃的存在及其厚度。正因如此，他们在 20 世纪 60 年代资助了大量研究工作，旨在探究月球表面以及陨石尘埃进入地球和月球的速率等问题。为了解答后一个问题，NASA 开始发射火箭和卫星，收集尘埃颗粒并测量其在近地空间的通量。研究结果在研讨会上公布，例如 1965 年 8 月在马萨诸塞州剑桥市举行的那次研讨会，该研讨会由 NASA 和史密森学会联合主办，会议论文集于 1967 年出版。¹⁴²

一些神创论作者引用了这卷论文集，以支持其标准的神创论论点，即美国宇航局（NASA）的科学家在太空中发现了大量尘埃，这证实了早先关于月球尘埃输入速率高、月球表面尘埃层厚厚的说法，而这层尘埃会对任何着陆航天器构成威胁。例如，斯卢舍尔（Slusher）报告说，他曾参与对 NASA 相关数据的深入审查，并发现……

“美国国家航空航天局和史密森学会于 1976 年公布的雷达、火箭和卫星数据显示，地球和月球周围的空间存在大量的宇宙尘埃。” ¹⁴³

（请注意，出版日期被错误地报道为 1976 年，而实际上是上文提到的 1967 年版。）同样，加莱也引用了同一卷 1967 年的会议论文集，并评论道：

“美国宇航局公布了轨道卫星收集的数据，证实了大量宇宙尘埃到达了地月系统附近。” ^{144, 145}

然而，这两种说法都大错特错，因为该论文集中发表的报告包含了诸如“探索者 16 号”、“探索者 23 号”、“飞马座 1 号”和“飞马座 2 号”等航天器上的探测器所采集的测量结果，以及对埃尔福德关于射电流星的研究和包含霍金斯、厄普顿和埃尔塞瑟等人研究成果的累积通量曲线的引用。同样的卫星测量结果和同

样的 研究人员对累积通量曲线的贡献也出现在 20 世纪 70 年代的论文中，这些论文的累积通量曲线已在此处以图 3、图 5 和图 7 的形式呈现。所有这些结果都支持每年分别有 10,000 至 20,000 吨和约 10,000 吨的陨石尘埃流入地球和月球的估计值——而不是斯卢舍和卡莱斯从该论文集中错误推断出的“巨大”和“浩瀚”的尘埃量。

阿波罗登月计划之前的登月

NASA 的下一步计划是直接探测月球表面，为载人登月做准备。为此，他们发射了七艘“游骑兵”号探测器，在坠落至月球赤道附近选定的平坦区域着陆的过程中，将电视图像传回地球。¹⁴⁶ 最后三艘探测器在 1964 年和 1965 年取得了惊人的成功，传回了数千张清晰的月球图像，使我们观测细节的能力提高了千倍。1964 年，“游骑兵 7 号”探测器通过电视传回了第一批高分辨率月球表面图像后，舒梅克¹⁴⁷ 得出结论：整个月球表面都被一层由反复撞击产生的粉碎性喷出物覆盖，这些喷出物的大小从巨石到细粉尘不等。在其余几次“游骑兵”号探测器坠毁后，“游骑兵”号的调查人员一致认为存在碎片层，但对此的解释各不相同，从几乎只有几厘米厚碎片的裸露岩石（Kuiper、Strom 和 Le Poole 的观点）到估计几米到几十米厚的碎片层（Shoemaker 的

观点) 不等。¹⁴⁸然而, 不能像某些人¹⁴⁹所做的那样, 推断 Shoemaker 指的是厚到足以吞噬着陆探测器的不稳定尘埃层。毕竟, 尘埃和巨石的固结程度与碎片层的厚度无关。无论如何, Shoemaker 描述的是由陨石撞击产生的碎片组成的地表层, 产生的尘埃来自月球岩石, 而不是来自坠落的陨石尘埃。

但美国宇航局的规划人员仍然希望在宇航员乘坐载人飞船登陆月球表面之前消除任何疑虑, 因此设计并建造了软着陆的“勘测者”系列探测器。然而, 苏联凭借“月球 9 号”探测器首次实现了月球软着陆, 抢先一步击败了美国。尽管如此, 美国第一艘“勘测者”探测器于 1966 年中期成功实现了软着陆, 并传回了超过 11000 张精美的照片, 这些照片以前所未有的细节展现了月球表面。从那时起到 1968 年¹月, 又有四艘“勘测者”探测器成功登陆月球表面, 它们拍摄的照片细节丰富、分辨率极高, 令人惊叹。该系列的最后一艘探测器 (“勘测者 7 号”) 传回了 21000 张照片以及大量的科学数据。但更重要的是,

“每艘细长的、四肢张开的飞行器小心翼翼地降落在月壤表面, 由于反推火箭的减速作用, 其速度基本被抵消, 三个着陆垫在柔软的月壤中仅陷入一两英寸。月壤表面的承载力高达每

平方英寸五到十磅，足以承受宇航员或着陆器的重量。” ¹⁵¹

两名勘测员携带了一台土壤力学表面取样器，用于测试土壤以及触手可及的任何岩石碎片。所有这些测试和观察都呈现出一致的月壤特征。正如帕萨乔夫所指出的：

“直到 1966 年苏联的月球号 and 美国的勘测者号探测器在月球表面软着陆，并传回照片，才最终解决了关于月球表面强度的争论；勘测者号稳稳地停在月球表面，下沉的深度不超过几厘米。” ¹⁵²

摩尔对此表示赞同，并指出：

“直到 1966 年，美国仍然认真对待深层尘埃漂移理论，而当月球 9 号软着陆证明该理论是错误的的时候，人们都松了一口气。” ¹⁵³

摩尔在谈到戈尔德 1955 年提出的“深层尘埃”理论时接着说，尽管这一理论一度获得了相当程度的认可，但随着 1966 年“月球 9 号”成功软着陆，“它最终被抛弃了”。 ¹⁵⁴ 因此，在 1966 年 5 月，“勘测者 1 号”在阿波罗 11 号之前三年登陆月球，关于月球表面尘埃层的长期争论终于尘埃落定，NASA 官

员们也终于确切地知道了月球表面尘埃的含量，以及它足以支撑航天器和宇航员的生存。

既然如此，神创论者就不能像某些人那样断言或暗示（见^{第 155-160 页}），大多数天文学家和科学家都预期存在厚厚的尘埃层。当然，有些人确实预期存在厚厚的尘埃层，但如果神创论者只选择性地提及少数预测尘埃层较厚的科学家，而忽略大多数基于同样科学依据预测尘埃层较薄的科学家，那就太不公平了。天文学教科书和专著承认月球上存在深层尘埃理论（^{161, 162}），如果它们旨在反映月球科学思想发展史，就理应如此。然而，这一事实并不能被用来支持对当时科学家就尘埃问题展开辩论的片面描述，尤其因为这些教科书和专著也指出（如前所述），1966 年的“月球”号和“勘测者”号软着陆已经解决了尘埃问题。此外，神创论者也不应引用像惠普尔（Whipple）¹⁶³那样的论文，他曾描述地球周围存在“尘埃云”，仿佛这代表了当时所有天文学家的观点。惠普尔的观点很容易被他的同事驳斥，因为后来的证据已经出现。事实上，惠普尔在后来的论文中没有继续宣扬他的观点，这清楚地表明他要么已经撤回了这一说法，要么被科学界压倒性的证据所压制，或者两者兼而有之。

阿波罗登月

还有两件事需要说明。首先，有人声称 NASA 之所以为阿波罗登月舱设计大型着陆垫，是因为他们对月球尘埃和飞船的安全性感到担忧。鉴于“勘测者”号探测器成功实现软着陆，这种说法并不恰当。阿波罗登月舱的着陆垫尺寸与其飞船的相对大小成比例。毕竟，“勘测者”号探测器的设计如此成功，并在月球表面着陆后依然完好无损，那么阿波罗登月舱理应沿用相同的基本设计。

至于阿姆斯特朗和奥尔德林在月球表面发现了什么，大家一致认为他们发现了一层薄薄的尘埃层。阿姆斯特朗踏上月球时的讲话记录很有启发意义：

“我站在梯子底部。登月舱的踏板只嵌入地面一两英寸，虽然靠近后你会发现地面非常非常细腻，几乎像粉末一样。有时甚至非常细。我现在要离开登月舱了。这是我个人的一小步，却是人类的一大步。” ¹⁶⁴ 164

片刻之后，当他迈出踏上月球表面的第一步时，他注意到：

“表面细腻如粉。我可以用脚趾轻轻地把它挑起来。它像粉状木炭一样，一层层地粘附在我的鞋底和靴筒侧面。我只陷进去一点点，大概

八分之一英寸，但我能看到靴子的脚印和鞋底纹路留在细沙颗粒上。”

过了一会儿，在采集岩石和细小材料的样本时，他说：

“这很有意思。表面很软，但当我用应急采样器采集样本时，偶尔会遇到非常坚硬的表面，不过看起来都是同一种非常粘稠的材料。我试着弄块石头进去。这里有几块。”

165

月球表面非常坚实，以至于阿姆斯特朗和奥尔德林很难将美国国旗插到岩石遍布、几乎没有尘土的月球表面上。

美国宇航局或其他科学家此后未就月尘问题发表任何评论，这一事实被一些人解读为某种^{默许}的沉默，他们希望某些所谓的未解之谜会自行消失。然而，这种沉默其实有其合理的原因——三年前，月尘问题就已经得到解决，阿姆斯特朗和奥尔德林只是证实了科学家们早已知晓的月球薄尘层。既然在阿波罗 11 号登月前这并非一个问题，那么在成功探索月球表面之后，也就没有必要继续讨论这个问题了。阿姆斯特朗本人在即将踏上月球表面时，或许也对月球表面的成分和强度有些担忧，正如他在后来的采访中似乎承认的那样，但毕竟是他身处现场，即将踏上月球，他又怎能不对月尘以及其他诸多相关问题感到担忧呢？

奥弗恩的证词

最后，还有威廉·奥弗恩博士的证词。

^{^{170, 171}} 由于他当时在斯佩里兰德公司

（Sperry Rand）的优尼瓦克（Univac）部门工作，负责水手四号（Mariner IV）探测器的电视子系统，他有时会与喷气推进实验室（JPL）参与阿波罗计划的人员交流。显然，他交谈的对象被分配到“游骑兵”

（Ranger）探测器任务中，正如我们所见，这些任务旨在探明月球表面的真实情况；换句话说，就是调查月球表面是否存在薄薄的尘埃层。用比尔自己的话说：

“我只是告诉他们，他们到达月球后应该不会发现超过一万年的尘埃。这是基于我的创造论观点，即月球很年轻。当时气氛非常紧张，有人提议我跟他们打赌，赌的就是月球上的尘埃数量。……然而，当勘测者号探测器后来登陆月球，发现几乎没有尘埃时，这些人却不肯兑现赌约。他们说第一次着陆可能只是碰巧在尘埃含量低的区域！所以我们一直等到……宇航员真正登陆月球……”

172

这个故事的真实性以及奥弗恩的诚信都毋庸置疑。然而，值得注意的是，奥弗恩与喷气推进实验室（JPL）的科学家们打赌时，人们对月球表面仍有很多猜测，当时“游骑兵”号探测器刚刚在月球上迫降，“勘测

者”号的软着陆尚未解决月球尘埃问题。此外，由于与奥弗恩合作的这些科学家在“勘测者”号任务后仍然犹豫不决，这表明他们可能不太了解 NASA 为解决月球尘埃问题所做的其他努力，特别是通过卫星测量所做的努力，而且他们可能没有与那些处于这些研究前沿的科学家们“密切接触”，而正是这些研究最终促成了“勘测者”号的软着陆，从而解决了关于月球尘埃的种种猜测。如果他们掌握更多信息，就不会与奥弗恩打赌，也不会因为阿姆斯特朗和奥尔德林发现的少量尘埃而感到尴尬，从而承认赌局失败。事实上，宇航员在月球表面可能面临的挑战，已由美国宇航局在 1966 年通过“勘测者”号探测器的软着陆实验得以解决。

月尘与月球年龄

最后一个需要解决的问题是，既然我们已经知道每年有多少陨石尘埃落到月球表面，那么我们目前对月球表面层的了解又能告诉我们关于月球年龄的什么信息呢？例如，月球上实际存在的尘埃层代表了多大的时间段？一方面，创造论者一直利用早期大量的尘埃输入数据来支持月球年龄较轻的观点；另一方面，进化论者则认为月球上少量的尘埃足以支持他们关于月球年龄为数十亿年的观点。

月球风化层

首先，月球表面由什么构成？它有多厚？经过阿波罗宇航员的实地考察，月球表面这层粉碎物质现在不再被称为月尘，而是被称为月壤，其中的细小物质有时被称为月土。月壤通常厚达数米，像一层连续的碎屑层一样覆盖在整个月球基岩表面。月海的月壤平均厚度为 4-5 米，而高地的月壤厚度约为其两倍，平均约为 10 米。¹⁷³月壤的地震特性在高地和月海似乎都比较均匀，但地震信号表明，月壤是由离散的层状结构组成，而不仅仅是“压实的尘埃”。由于微陨石的搅动，其顶部表面非常松散，但约 20 厘米以下的深度则非常压实，这可能是由于撞击造成的震动所致。

阿波罗计划带回的钻芯样本研究了风化层的复杂层状结构。这些样本清晰地表明，风化层并非均质的碎石堆，而是由一系列喷出物层层叠加而成。¹⁷⁴一个看似矛盾的现象是，风化层在小尺度上混合均匀，同时又呈现出层状结构。例如，阿波罗 15 号深层岩芯管长 2.42 米，却包含了 42 个主要的结构单元，厚度从几毫米到 13 厘米不等。研究发现，相邻岩芯管中的层之间通常没有相关性，但各个层之间混合均匀。这一矛盾的解释是，风化层不断地受到大小陨石和微陨石的“改造”。每次撞击都会颠覆大部分微地层结构，并产生喷出物层，其中一些是新的，一些则是旧层的

残余。微陨石搅动着新形成的表层，但深层搅动则较为罕见。其结果是，复杂的层状月壤逐渐形成，并处于持续的流动状态，目前位于表层的颗粒物未来可能被撞击掩埋。如此一来，月壤如同遭受重创的战场一般不断翻动。然而，目前似乎只有月球表面上层 0.5-1 毫米的物质受到陨石涌入的强烈搅动和混合。尽管如此，总体而言，月壤仍然是月球上所有物质与涌入的陨石（包括陨石本身和尘埃）的主要混合层。

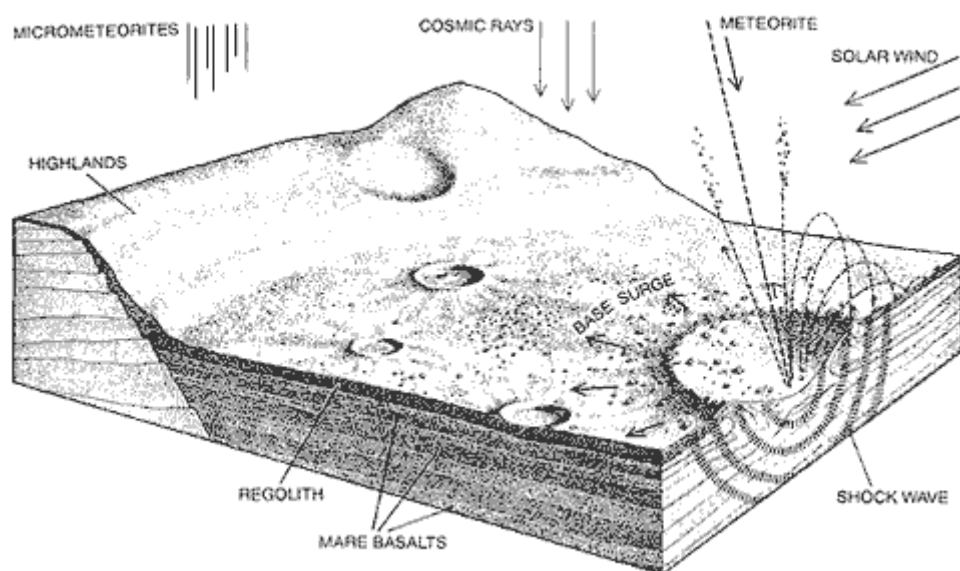


图 9. 与地球上的侵蚀过程相比，如今月球表面的侵蚀过程似乎极其缓慢。微陨石的轰击被认为是主要原因。大型陨石撞击月球表面的概率很低，它们会挖掘基岩并将其抛射到数千平方公里的范围内，有时会形成从撞击坑向外辐射的长条状物质。大部分陨石在撞击时会汽化，较大的碎片会形成次生撞击坑。在月海区域发生的此类事件会粉碎并搅动构成月壤的碎石和尘埃。

伴随而来的高温尘埃云、气体和冲击波可能会将尘埃压实成角砾岩。宇宙射线持续轰击月球表面。在月昼期间，来自太阳风的离子和未屏蔽的太阳辐射会撞击月球表面。（改编自 Eglinton 等人，¹⁷⁶）

月球表面过程

那么，除了陨石尘埃的涌入之外，月球表面还有哪些其他过程在发生？尤其是在月球上没有大气层和水来像地球上那样风化和侵蚀岩石的情况下。根据阿什沃思和麦克唐纳的说法，

“持续影响月球表面的三大主要过程是陨石
撞击、太阳风溅射和热侵蚀。” ¹⁷⁵

这些过程对月球表面侵蚀的相对贡献取决于各种因素，例如撞击体的尺寸和成分以及陨石撞击和尘埃流入的速率。当然，与地球上的侵蚀过程相比，月球表面的这些侵蚀过程极其缓慢。图 9（引自 Eglinton 等人，¹⁷⁶）试图说明这些月球表面侵蚀过程。

在这些侵蚀过程中，最重要的显然是撞击侵蚀。由于月球上没有大气层，撞击月球的陨石尘埃不会只是缓慢地飘落到月球表面，而是以平均速度撞击月球表面，据估计该速度在 13 至 18 公里/秒之间

¹⁷⁷，或最近的估计为 20 公里/秒

¹⁷⁸，最大报告速度为 100 公里/秒

¹⁷⁹。撞击产生的尘埃碎片不仅取决于速度，还取决于撞击尘埃颗粒的质量。

人们曾多次尝试量化月球表面裸露岩石因尘埃侵蚀而造成的侵蚀量。Hörz 等人¹⁸⁰在研究了阿波罗宇航员带回的月球岩石样本表面的微陨石坑后，提出了 0.2-0.4 毫米/⁶年（或 $20-40 \times 10^{-9}$ 厘米/年）的侵蚀速率。McDonnell 和 Ashworth¹⁸¹

讨论了不同粒径和暴露表面积下的侵蚀速率范围。他们基于阿波罗月球岩石样本以及“勘测者 3 号”相机的研究，提出了 $1-3 \times 10^{-7}$ 厘米/年（或 $100-300 \times 10^{-9}$ 厘米/年）的侵蚀速率。他们后来修正了这一估算，得出结论：在数十米尺度上，撞击侵蚀导致每年约有 10^{-7} 厘米（或 100×10^{-9} 厘米）的月球物质被移除。¹⁸² 然而，在另一篇论文中，Gault 等人¹⁸³ 列出了月球表面裸露岩石的计算磨损率，并与根据太阳耀斑粒子径迹确定的观测侵蚀率进行了比较。他们忽略了早期卫星数据，仅对根据最新最佳卫星数据和月球岩石计算出的值取平均值，得出的侵蚀率估计值为 0.28 厘米/⁶年（或 280×10^{-9} 厘米/年），而他们从文献中找到的观测侵蚀率平均值为 0.03 厘米/⁶年（或 30×10^{-9} 厘米/年）。然而，他们自然倾向于采用自己基于卫星数据得出的“最佳”估算值，该估算值包括通量和由此产生的磨损率，后者为 0.1 厘米/⁶年（或 100×10^{-9} 厘米/

年)，与 McDonnell 和 Ashworth 的估算值相同。Gault 等人指出，该值比观测值的“共识”高出近一个数量级，这种差异反映了从月球岩石推导出的陨石尘埃输入量估算值与卫星数据之间的差异。

这些估算值显然因人而异，但 $30-100 \times 10^{-9}$ 厘米/年似乎代表了一个“中间值”。然而，这种撞击侵蚀速率仅适用于裸露的岩石。正如麦克拉肯和杜宾所述，一旦最初由尘埃涌入和撞击侵蚀形成的地表尘埃层，这层初始的地表尘埃层就能保护下方的基岩表面免受尘埃颗粒持续轰击的侵蚀。¹⁸⁴如果持续的撞击侵蚀会增加地表层和风化层中的尘埃和岩石碎片，那么就需要某种机制，将产生的尘埃不断地从岩石表面输送走，从而使裸露的岩石再次暴露出来，以进行持续的撞击侵蚀。如果没有某种主动输送过程，山峰和山脊上裸露的岩石表面将被磨损，形成类似月球表面的圆润地貌（这正是阿波罗宇航员所发现的），尘埃也会因此在坡底堆积成更厚的层。如图 9 所示。

因此，微陨石对月球表面的轰击被认为是造成表面侵蚀的主要原因。然而，按照目前的侵蚀速度，需要一百万年才能从整个月球表面去除约 1 毫米厚的岩石层并将其转化为尘埃。偶尔，一颗大型陨石会撞击月球表面（再次参见图 9），穿透尘埃层直达基岩，并将碎片喷射到数千平方公里的范围内，有时甚至形成从

撞击坑向外辐射的长条状物质。大部分陨石在撞击时会汽化，较大的碎片则会形成次生撞击坑。在月海区域发生的此类事件会粉碎并搅动构成月壤的碎石和尘埃。

太阳风是月球表面侵蚀的另一个主要因素。太阳风主要由质子、电子和一些 α 粒子组成，它们不断地被太阳喷射出来。由于月球几乎没有大气层或磁场，这些太阳风粒子以平均 600 公里/秒的速度毫无阻碍地撞击月球表面，将单个原子从岩石和尘埃矿物晶格中击出。太阳风的主要成分是氢离子(H^+)、氦离子(He)和其他元素，撞击对岩石硅酸盐晶体结构的破坏会形成缺陷和空隙，这些缺陷和空隙会容纳气体和其他元素，这些气体和其他元素同时被注入岩石表面。但单个原子也会被击出岩石表面，这被称为溅射或溅射侵蚀。由于太阳风中的粒子以如此高的速度撞击月球表面，

“可以肯定地得出结论，大多数溅射原子的喷射速度都高于月球的逃逸速度。” ¹⁸⁵

因此，通过这种溅射侵蚀，月球似乎会向太空造成净侵蚀质量损失。

关于这种侵蚀损失的速率，Wehner¹⁸⁶曾提出溅射速率约为 0.4 埃 (Å)/年。然而，随着对月球

表面太阳风粒子密度的实际测量以及可用于分析的月球岩石样本的出现，用于溅射速率计算的太阳风强度被降低，因此溅射速率本身的估计值也相应降低（降低了一个数量级）。McDonnell 和 Ashworth¹⁸⁷ 估计月球岩石的平均溅射速率约为 $0.02 \text{ \AA}/\text{年}$ ，他们后来将其修正为 $0.02\text{--}0.04 \text{ \AA}/\text{年}$ ¹⁸⁸。进一步的实验工作将他们的估计值修正为 $0.043 \text{ \AA}/\text{年}$ ¹⁸⁹，Hughes 在《自然》杂志¹⁹⁰ 上报道的这一结果。 $0.043 \text{ \AA}/\text{yr}$ 这个数值在后续的实验工作中被继续使用和证实，¹⁹¹ 尽管 Zook¹⁹² 认为该速率可能更高，甚至高达 $0.08 \text{ \AA}/\text{yr}$ 。¹⁹³ 即便如此，如果这种溅射侵蚀速率在过去一直以这样的速度持续下去，那么在十亿年内，月球表面下沉的深度也仅不到一厘米。这不仅适用于固体岩石，也适用于尘埃层本身，尘埃层的厚度实际上会在此期间减少，这与陨石尘埃涌入导致的厚度增加相反。因此，溅射侵蚀并不会通过向月球表面添加尘埃来起到作用，而且无论如何，这是一个非常缓慢的过程，其总体影响微乎其微。月球表面另一种潜在的侵蚀过程是热侵蚀，即由于月球昼夜循环引起的显著温度变化，撞击坑/陨石坑区域周围的月球表面发生的崩解。Ashworth 和 McDonnell¹⁹⁴ 对月球岩石进行了测试，使其经历温度循环变化，但发现“无法检测到任何表面变化”。因此，他们认为热侵蚀可能“并

非主要作用力”。同样，McDonnell 和 Flavill¹⁹⁵也进行了进一步的实验，发现他们的样本在经历温度循环后没有出现任何“降解或增强”的迹象。他们报告说：

“这些条件在热力学上与月球的昼夜循环相当，因此我们必须得出结论，在这个尺度上，热循环是一种非常微弱的侵蚀机制。”

文献中唯一提及的另一种可能的侵蚀过程是利特尔顿¹⁹⁶和戈尔德¹⁹⁷提出的。他们认为，来自太阳的高能紫外线和 X 射线会缓慢地将月球岩石粉碎成尘埃，数百万年后，这将在月球表面形成厚厚的尘埃层。这一理论在 20 世纪 50 年代被提出并引发了当时的争论，但自 20 世纪 60 年代中期开始对月球进行直接探测以来，技术文献中再也没有出现过关于这一潜在过程的论述，无论是支持还是反对。人们只能推测，要么这一理论被忽略或遗忘，要么它根本无法产生任何显著的侵蚀作用，这与最初提出者的观点相反。后一种情况很可能是真的，因为正如撞击侵蚀一样，这种辐射侵蚀的效果也取决于是否存在一种机制来清除辐射侵蚀产生的尘埃。无论如何，即使是薄薄的尘埃层也极有可能直接吸收入射射线，而月球上仍然存在裸露的岩石表面这一事实清楚地表明，利特尔顿和戈尔德提出的辐射侵蚀过程在假定的数百万年

时间里并未有效发挥作用，否则所有岩石表面早就应该被粉碎成尘埃了。当然，另一种解释是，月球上仍然存在裸露的岩石表面也可能意味着，如果辐射侵蚀过程确实发生，那么月球就相当年轻。

“年龄”考量

那么月球表面究竟有多少尘埃呢？由于热侵蚀、溅射侵蚀和辐射侵蚀的影响微乎其微甚至可以忽略不计，因此可以忽略它们。这样一来，就只剩下陨石尘埃的输入量以及它们撞击月球表面裸露岩石时产生的尘埃（撞击侵蚀）了。然而，我们的主要目标是确定，与当前的陨石尘埃输入速率相比，月壤和表面尘埃层中的陨石尘埃含量是否能准确反映月球本身的年龄，并由此推断地球和太阳系的年龄。

我们之前得出结论，根据所有现有证据以及不同科学家采用的估算方法，月球表面陨石尘埃的输入量约为每年 1 万吨，即 2×10^{-9} 克/平方厘米/年。微陨石的密度估算值差异很大，但通常采用 19 个/立方厘米的平均值。因此，按照这个明显的尘埃输入速率，月球表面需要大约 10 亿年才能积累起仅 2 厘米厚的尘埃层。阿波罗号宇航员报告称，月球表面尘埃层的厚度在不到 1/8 英寸（3 毫米）到 3 英寸（7.6 厘米）之间。因此，如果这层表面尘埃仅由陨石尘埃组成，那么按照目前的尘埃输入速率，这层表面尘埃的积累时间将在 1.5 亿年

（3 毫米）到 38 亿年（7.6 厘米）之间。显然，这种推理方式不能用来论证月球乃至太阳系的年龄都很年轻。

然而，正如我们已经看到的，在薄薄的表层尘埃之下是月壤，其在月海地区厚度可达 5 米，在月高地平均厚度为 10 米。显然，由于陨石尘埃（微陨石）撞击搅动，这层薄薄的表层尘埃非常松散，但其下方的月壤由各种大小的岩石碎屑（包括细小的颗粒，即月壤）组成，并高度压实。尽管如此，月壤似乎仍在不断地受到大小陨石和微陨石的“改造”，目前位于地表的颗粒未来可能会被撞击深埋。这意味着，随着月壤的翻动，薄薄的表层中的陨石尘埃颗粒最终会与下方的月壤混合。因此，也不能假定这层松散的表层完全由陨石尘埃组成，因为撞击也会将月壤带到这层松散的表层中。

然而，人们已尝试估算混入月壤中的陨石物质比例。Taylor¹⁹⁸报告称，在月海土壤中识别出的陨石成分出人意料地均匀，含量约为 1.5%，且其丰度模式与原始未分异的 I 型碳质球粒陨石接近。如前所述，这种陨石成分是通过分析月壤中风化岩石和土壤中的微量元素来确定的，并假设任何微量元素差异都代表了添加到土壤中的陨石物质。Taylor 还补充说，其他陨石（普通球粒陨石、铁陨石和石铁陨石）的成分似

乎并不存在于月壤中，这可能对这种陨石物质的来源具有一定的意义，其中大部分陨石物质被认为是微陨石的输入。目前尚不清楚形成大型陨石坑的陨石对月壤的贡献，但泰勒认为可能高达月壤总量的 10%。此外，太阳风也是外来元素的来源之一，据估计其对土壤的贡献在 3%到 4%之间。这意味着来自月外的物质对月壤的总贡献约为 15%。因此，在月海上方五米厚的月壤中，陨石成分的厚度将接近 60 厘米，按照目前估计的陨石流入速率，这需要近 300 亿年的时间才能积累到如此厚的月壤，是月球演化年龄的六倍。

月球表面布满陨石坑，最大的陨石坑直径达 295 公里。高地地区的陨石坑密度远高于月海地区，这使得早期研究者认为月球高地可能代表了月球表面最古老的裸露岩石。阿波罗宇航员带回的岩石样本经放射性测年证实了这一推测，并由此构建了详细的月球地层学和演化地质年代学框架。由此得出结论：月球在其早期历史上曾遭受大量陨石的猛烈撞击，因此所有被认为超过 39 亿年的高地地区都布满了直径 50-100 公里的陨石坑，并且在 10 米厚的月壤层下方，存在着一层角砾岩和破碎基岩，其厚度在某些地方估计超过 1 公里。

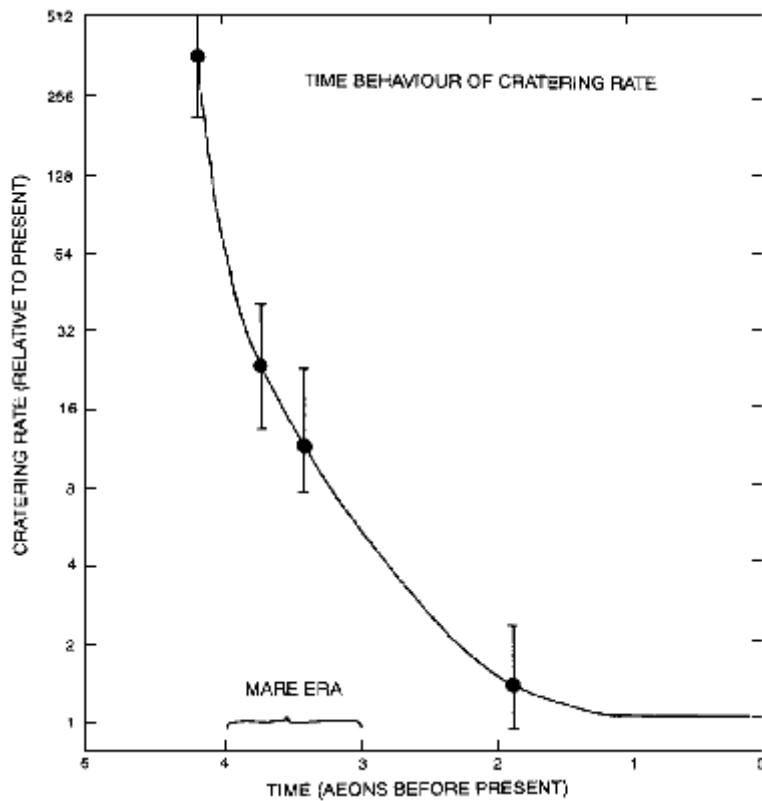


图 10. 月球陨石坑形成历史（改编自 Taylor²⁰⁰）。在进化论者的时间尺度上，一个纪元代表十亿年，而垂直线表示曲线上每个数据点陨石坑形成率估计的误差范围。

经过适当的校准，建立了相对陨石坑年代学，进而可以估算并绘制月球历史上的陨石坑形成速率，如图 10 所示。²⁰⁰因此，月球表面陨石坑密度与放射性“年龄”之间似乎存在普遍的相关性。然而，不同地点的陨石坑密度无法用陨石或小行星群的简单指数衰减曲线来拟合。²⁰¹相反，似乎至少需要两组不同的天体。第一组天体被认为近似于当今的陨石通量，而第二组天体则被认为是造成约 40 亿年前早期强烈轰击的天体。月球高地地区陨石坑密布的表

面记录了这种早期强烈的轰击，这可以解释这些地区较厚的月壤（厚达 10 米）的存在。

由此可见，早期强烈的轰击时期是由大量的陨石及其产生的陨石尘埃造成的，这些陨石尘埃如今应该可以在月壤中识别出来。事实上，Taylor²⁰²列出了高地月壤中的三种陨石碎片：微陨石成分、大型撞击坑形成天体的碎片以及早期强烈轰击期间添加的物质。然而，后者的量化一直很困难。尽管微量元素比值分析已能够识别出六类古代陨石成分，但这些成分与目前已知的任何陨石类型（包括铁陨石和球粒陨石）都不对应。这些物质似乎代表了在月球早期强烈轰击期间，造成月球高地饱和撞击坑的大型撞击体的碎片。正是早期强烈的陨石轰击及其伴随的较高陨石物质输入速率，不仅可以解释月球高地较厚的月壤，还可以解释我们计算出的（如上所述）月海较薄月壤中 12% 的陨石成分，而按照目前的陨石输入速率，这 12% 的陨石成分需要长达 300 亿年的时间才能积累完成。尽管月海被认为比月球高地年轻，且尚未经历同样的饱和撞击，但图 10 的撞击速率曲线表明，月海形成后不久的陨石输入速率仍然几乎是目前输入速率的 10 倍，因此月壤中的大部分陨石成分可能在月海形成后的早期阶段就已迅速积累。这样就消除了进化论时间尺度中明显的积累时间跨度异常，并表明如果采用均变论假设，

月海风化层中的陨石成分仍然与其假定的 30 亿年年龄相符。当然，这对于那些认为均变论假设可以应用于月尘来否定进化论者关于月球极其古老年龄的观点的年轻地球创造论者来说，仍然远远不够令人满意。

鉴于月海风化层中高达 10%的成分可能来自大型陨石坑形成陨石，这些大型陨石坑形成陨石的撞击侵蚀^很可能在月海风化层的形成过程中发挥了重要作用，包括尘埃的产生，尤其是在陨石撞击裸露的月岩时。此外，任何撞击地球的陨石，或者微陨石，都会形成比自身大得多的陨石坑，^{而且} 由于大多数撞击都是倾斜的，由此产生的二次撞击坑实际上可能在产生更多尘埃方面更为重要。然而，要产生更多尘埃，撞击的陨石或微陨石必须撞击月面上裸露的岩石。因此，如果月面上要持续存在裸露的岩石，就必须存在某种机制，能够将尘埃从岩石上快速移除，并需要某种输送机制将其运送并聚集到较低的区域，例如月海。

除了陡峭坡度这一显而易见的因素外，人们还提出了其他一些解释，但陡峭坡度无论如何都只会造成局部堆积。例如，戈尔德列出了五种可能性²⁰⁶，但所有这些都只是高度推测，尚未得到证实。最近，麦克唐纳²⁰⁷提出，尘埃颗粒表面的静电荷可能导致这些颗粒在月球表面悬浮高达 10 米甚至更高。随着电荷的丢失，它们会浮回表面，并更有可能

沉降在较低的区域。麦克唐纳没有估算有多少尘埃可能通过这一过程移动，因此这一推测仍处于初步阶段。无论如何，如果这种输送机制在月球表面发挥作用，那么由于月海地势较低，我们预期月壤会更厚。然而，事实是，在推测早期遭受强烈撞击的高地地区，月壤反而更厚，撞击产生的尘埃只是在局部堆积，并没有被输送到任何显著的距离。

考虑到现有数据，显而易见，月球表面和月壤中的陨石尘埃含量与目前月球表面陨石尘埃的输入速率完全吻合，符合进化论者提出的数十亿年时间框架，甚至包括月球早期历史上更高的输入速率——当时强烈的撞击形成了月球表面的许多陨石坑。因此，就“证明”月球年轻而言，目前已知的陨石尘埃输入速率至少低了两个数量级。另一方面，进化论者也并没有利用尘埃输入速率来“证明”他们提出的数十亿年月球历史跨度，这倒也合情合理。（他们已经认识到一些问题和不确定性，因此更多地依赖于对月球岩石的放射性测年，以及对岩石和土壤样本的广泛地球化学分析，所有这些都是月球地层序列的大背景下进行的。）当然，目前的尘埃流入速率并不能否定月球是年轻的。

神创论者的回应尝试

一些神创论者已经初步承认，月球尘埃论证已不再像最初那样具有说服力。例如，泰勒（保罗）²⁰⁸ 沿用

了其他神创论者常用的论证思路，指出根据已发表的尘埃流入速率和进化时间尺度的估算，许多进化论者预期宇航员会在月球上发现一层非常厚的松散尘埃，因此当他们只发现一层薄薄的尘埃时，就意味着月球很年轻。然而，泰勒随后承认，情况似乎并不像一些人最初认为的那样简单明了，尤其因为进化论者现在可以指出一些似乎更为精确的测量结果，这些结果表明尘埃流入速率较小，且与他们的时间尺度相符。事实上，他指出，用这一特定过程来反驳月球古老论证的证据已经减弱，而且，在月壤中发现的据称是陨石尘埃的物质也削弱了这一论证。然而，与加莱一样，泰勒也引用了美国宇航局的报告²¹¹，该报告声称地球和月球附近存在大量的宇宙尘埃（正如我们之前看到的，仔细阅读该报告中发表的论文并不能证实这一说法）。他还回应了德扬的评论

²¹²，即所有关于月球和太阳系起源的进化论都预测，在月球早期会有大量的尘埃进入，因此应该会形成非常厚的尘埃层，但目前尚未发现。这种论点无法被创造论者所接受，因为正如我们前面所看到的，月壤中陨石尘埃的含量似乎与进化论者的观点相符，即在月球早期历史上，陨石尘埃的流入速率要高得多，这与所谓的“早期强烈轰击”同时发生。

事实上，从图 10 可以看出，由于月球早期撞击坑的形成速率是现在的 300 多倍，那么月球早期陨石尘埃的流入量也同样是现在的 300 多倍。这意味着每年会有超过 300 万吨的尘埃进入月球表面。即使按照这个速率，也需要十亿年的时间才能在月球表面积累超过 6 米厚的陨石尘埃，而且其中无疑还会混杂着少量由大型撞击坑形成的陨石撞击产生的尘埃和岩石碎片。然而，图 10 显示，在这十亿年间，陨石尘埃的流入速率据推测迅速下降，因此，实际上在这十亿年间积累的陨石尘埃和撞击碎片的数量要少得多。换句话说，月壤和表层中的尘埃仍然与进化论者的观点相符，即月球早期历史上尘埃的流入率较高，因此创造论者不能以此来加强这个相当薄弱的论点。

此外，泰勒和德扬都不能暗示，进化论者认为太阳和行星是由一团巨大的尘埃云形成的，而这团尘埃云在过去显然要厚得多，因此他们的理论就会预测月球表面存在非常厚的尘埃层。相反，真正重要的是月球形成后假定的尘埃流入，因为只有在那时，月球表面才可以用来收集尘埃，而我们现在可以研究月球表面及其上的尘埃。因此，除非月球形成后尘埃流入量远超进化论者所假设的量（参见图 10 和我们上面的计算），否则神创论者也不能以此为由进行反驳。

为了反驳进化论者的论点，德扬提出了第二个反对意见。他认为，修正后的太空尘埃积累量数值远低于之前的估计值值得商榷，科学家们仍在不断调整对落到地球和月球上的流星和太空尘埃的估算。²¹³

如果这意在暗示进化论者对目前的尘埃输入量估算值存在质疑，那么事实并非如此，因为人们普遍认为之前的估算值严重高估了尘埃输入量。正如我们所见，目前的数据得到了广泛的支持，它比许多早期的估算值低了两个数量级。目前的估算值或许需要进行一些微调，但肯定不会有任何重大调整。

尽管德扬有所暗示，但泰勒（伊恩）²¹⁴却直言不讳地指出，阿波罗登月后，月球陨石尘埃输入量的估算值立即被大幅修正。据称，宇航员的观测结果推翻了之前严重的过高估计，而这一修正过程是悄无声息却又有条不紊地进行的。事实并非如此。泰勒暗示，空间研究委员会（COSPAR）的成立目的就是大幅降低陨石尘埃输入量的估算值，而且他们仅仅依靠卫星探测器、目视流星计数和黄道光观测等间接技术进行测量，而非直接研究尘埃本身。这种说法忽略了这些不同的测量技术对于涵盖所有粒径范围都是必要的，而且他们所使用的许多数据都是在阿波罗登月之前的 20 世纪 60 年代收集的。此外，同样的数据在 20 世纪 60 年代就曾被用于估算尘埃输入量，而这些估算结果与宇航

员随后发现的少量尘埃层相吻合。换句话说，在阿波罗登月之前，这些数据就已经让大多数科学家确信月球上几乎不会发现尘埃，因此，COSPAR 的尘埃输入量估算结果恰好与月球表面实际发现的尘埃量完全一致，这并非什么“蹊跷”之事。此外，COSPAR 的科学家们并没有忽略月球表面的尘埃，而是利用月球岩石和土壤样本进行研究，例如，他们研究了月球微陨石坑，认为这些微陨石坑记录了历史上陨石尘埃的输入。他们还尝试利用微量元素地球化学方法来确定月球表面层及其下方风化层中陨石尘埃的含量。

德扬提出的最后一个观点是，或许月球上确实存在一层厚厚的尘埃层，但它已被陨石撞击熔入岩石中。

²¹⁵这与之前关于重新评估尘埃积累速率并寻找月球尘埃压实机制的评论类似，旨在解释进化论者时间尺度所需的月球表面尘埃缺失现象。

²¹⁶为了佐证这一观点，德扬引用了穆奇的著作²¹⁷，但穆奇在引用的篇幅中仅讨论了月壤的厚度和撞击坑产生的碎片，其细节与本文先前讨论的内容相似。至于厚厚的月球尘埃层确实存在但已被陨石撞击熔入岩石中的观点，德扬没有引用任何参考文献，也找不到任何相关资料。泰勒在高原地区描述了一种“巨型月壤”²¹⁸，这是一个厚度超过一公里的角砾岩、断裂带和碎石层，据推测

是由早期强烈的撞击造成的，这与陨石撞击将尘埃熔合到岩石中的观点截然相反。事实上，穆奇²¹⁹、阿什沃思和麦克唐纳²²⁰以及泰勒²²¹都提到陨石和微陨石撞击导致月壤中的土壤和碎石翻动，使得月壤成为尚未熔合到岩石中的月球物质的原始混合层。月壤中发生了强烈的压实作用，但这与月球表面陨石尘埃的含量问题几乎无关，因为陨石尘埃的含量已通过微量元素分析估算得出。

Parks²²²也曾论证，在进化论者的时间尺度内，陨石撞击月球表面并解体，会产生大量的尘埃。这些尘埃与陨石尘埃随时间推移的输入量相加，应该能在很短的时间内解释月壤中尘埃的含量。然而，已有研究指出，月海月壤中这些碎片成分仅占 10%，这一比例也与进化论者假设的时间尺度内的撞击坑形成率相符。他随后重申，鉴于进化论者关于太阳系天体由尘埃吸积形成的理论，过去的尘埃输入率应该更高。然而，进化论者假设月球表面早期遭受了强烈的撞击，其撞击坑形成率（以及尘埃输入率）比现在高出两个数量级（如前所述），这同样否定了上述论点。最后，他推断，即使尘埃输入速率远低于研究人员最初的假设，其贡献也应该远远超过月球表面 1-2 英寸厚松散尘层中陨石尘埃的 1.5%。他引用的关于月球表面薄薄的松

散尘层中陨石尘埃百分比的参考文献是 Ganapathy 等人^{²²³}。然而，仔细查阅该论文，了解他们分析工作所用样本的来源后，我们发现，富含多种陨石微量元素的四个土壤样本来自地表以下 13-38 厘米的深度，是通过岩芯管提取的。换句话说，这些样本来自地表 1-2 英寸厚松散尘层**下方**的风化层，因此，Parks 对这项分析工作的应用与他的论断毫无关联。总之，如果使用当前估计的陨石尘埃流入率来计算在进化论者的时间尺度内月球表面应该有多少陨石尘埃，就会发现结果是一致的，正如上面已经表明的那样。

帕克斯可能受到了布朗的影响，他引用了布朗的私人信件。布朗在他自己的出版物^{第 224 页}中写道：

“如果过去 46 亿年来月球上陨石尘埃的流入速度一直保持不变，那么尘埃层的厚度应该超过 2000 英尺。”

此外，他指出这些计算是基于 Hughes^{²²⁵}和 Taylor^{²²⁶}的数据进行的。这令人费解，因为 Taylor 并未明确指出陨石尘埃的流入速率，而只是引用了其他人的研究成果；而 Hughes 则专注于月球微陨石坑，只是间接提及了陨石尘埃的流入速率。无论如何，正如我们已经看到的，按照目前估计的每年约 1 万吨的流入速率，每十亿年月球表面才会积累仅 2 厘米厚的陨石尘埃，因此 46 亿年后，总厚度也仅为 9.2

厘米。人们不禁要问，Brown 所说的 2000 英尺（约 610 米）究竟是从何而来？如果他考虑到了泰勒提到的早期强烈的陨石轰击，那么我们已经看到，即使陨石尘埃的流入速率是目前数值的 300 倍，我们仍然能够轻松地解释在进化论者的时间尺度内，月球风化层和松散表层中发现的陨石尘埃的数量。虽然捍卫创造论的立场完全合理，但令人费解的计算却不妥。创造科学应当始终是严谨的科学；正如我们的批评者经常指出的那样，充分运用专业文献并真诚地面对真实数据，才能更好地服务于创造科学。

结论

那么，进化论者的论点是否存在漏洞？他们声称，目前月球表面陨石尘埃的涌入量以及在薄薄的月球表面尘埃层和其下层风化层中发现的尘埃量，与他们所认为的月球数十亿年的历史尺度并不矛盾。根据我们目前掌握的证据，答案似乎是否定的。利特尔顿和戈尔德提出的可能的侵蚀过程（即辐射侵蚀）仍然存在不确定性，这或许只是年轻月球模型中尘埃含量的一种可能解释，但尘埃不应再被视为进化论者面临的主要难题。尽管有人可能会认为，目前仅在月球一侧的 13 个地点（其中 6 个由宇航员完成，7 个由无人航天器完成）进行了短暂的直接地质调查，但月球表面和月球陨石涌入速率似乎都已得到了相当充分的表征。

此外，关于陨石尘埃输入速率的测量技术和方法，仍存在一些未解决的问题。例如，用于测量和计数月球微坑的岩石表面暴露时间取决于均变论的年龄假设。如果实际暴露时间要短得多，那么基于月球微坑的尘埃输入量估算值就需要大幅修正，甚至可能要提高几个数量级。目前，我们已经看到月球微坑数据和卫星探测器数据之间存在公认的差异，前者比后者低一个数量级。Hughes²²⁷解释说，陨石尘埃输入量在过去 10 万年中增加了四倍，而 Gault 等人²²⁸则承认，如果接受这些年龄数据，那么在过去几十年中，陨石尘埃输入速率必须增加十倍！我们并不清楚这种情况是如何发生的，但根据对过去撞击坑形成率的估算，过去确实存在更多的陨石，并由此推断陨石尘埃也更多。这显然与基于月球微撞击坑数据的说法相矛盾。这似乎表明，卫星探测器的测量数据更为可靠，但仍有人认为，卫星上的尘埃收集区域非常小，尘埃收集时间也太短，不足以代表地月系统周围空间的尘埃量。

那么，神创论者是否应该继续将月尘作为月球、地球和太阳系年轻的明显证据呢？显然，答案是否定的。现有证据的分量表明，进化论者的论点并无矛盾之处，因此，如果神创论者想要根据陨石尘埃来论证月球年轻，那么举证责任完全在于他们。因此，一位神创论

作家最近逐字逐句地重复他五年前发表的文章，坚持认为陨石尘埃是月球年轻的证据，而这完全无视了与其论点相悖的压倒性证据，这是不可原谅的。或许，神创论者想要解决这个问题，只能等到未来月球表面实验室的科学家们进行更直接的地质调查和测量。届时，科学家们可以实际收集和测量尘埃的流入量，并研究原地尘埃的特性及其与月壤和任何月球表面过程的相互作用。

结论

过去三十年间，人们尝试了多种方法来估算地球和月球上的陨石尘埃输入量。在地球上，化学方法得出的结果在每年 10 万至 40 万吨之间，而基于卫星和雷达数据的累积通量计算结果则在每年 1 万至 2 万吨之间。目前，大多数权威人士倾向于采用卫星数据，尽管也存在输入量可能达到每年 10 万吨的可能性。在月球上，经过对各种技术的评估，总体而言，证据表明陨石尘埃的输入量约为每年 1 万吨。

尽管一些科学家在航天器登月前曾推测月球表面会有一层厚厚的尘埃层，但也有许多科学家持不同意见，他们预测月球尘埃层会很薄且足够坚固，足以支持载人登月。1966 年，苏联的“月球 9 号”探测器和美国的五艘“勘测者”探测器分别成功实现了月球表面的软着陆。其中，“勘测者”探测器的着陆垫仅陷入柔

软的月壤一两英寸，传回的照片也最终解决了关于月球尘埃层厚度和强度的争论。因此，在 1969 年阿波罗号宇航员登月之前，月球尘埃问题已经尘埃问题得到解决。他们的月球探测结果证实了大多数人的预测，以及卫星搭载的探测器系统对陨石尘埃输入量的测量结果——这些测量表明月球尘埃的输入量非常少。

计算表明，地表尘埃层中的陨石尘埃含量，以及微量元素分析所显示的月壤中的陨石尘埃含量，与进化论者所设想的时间尺度内当前的陨石尘埃输入速率相符。尽管进化论者的论证仍存在一些尚未解决的问题，但目前神创论者不应利用月球尘埃论证（即基于均变论假设来反驳月球和太阳系古老性的观点）来达到目的。

读完这篇文章，你心里是否有一些触动？有没有一些新的想法，或者值得你认真思考的问题？或许，你也开始重新思考自己的信仰和人生的方向。

如果你愿意，现在就可以向上帝祷告，打开心门，成为祂的儿女。祷告不需要华丽的言辞，只要一颗真诚的心。你可以这样祷告：

天父上帝，今天我来到你面前，愿意立定心志，宣告我相信耶稣基督是我的救主，是我生命的主。我愿意

离开过去那些不讨你喜悦的生活方式，求你赦免我的过犯。靠着你的恩典，帮助我学习顺服你、爱人如己，活出你所赐的新生命。求圣灵每天引导我、扶持我，使我一生荣耀你的名。奉主耶稣基督的名祷告，阿们。

如果你已经做了这个祷告，愿你知道，你并不孤单。信仰的道路需要陪伴和成长。鼓励你在自己居住的地方，寻找一间合适的教会，与弟兄姐妹一同聚会、学习和成长。

如果你有任何疑问，或在信仰上需要帮助，欢迎随时写信与我们联系。我们愿意倾听，也愿意与你一同前行。