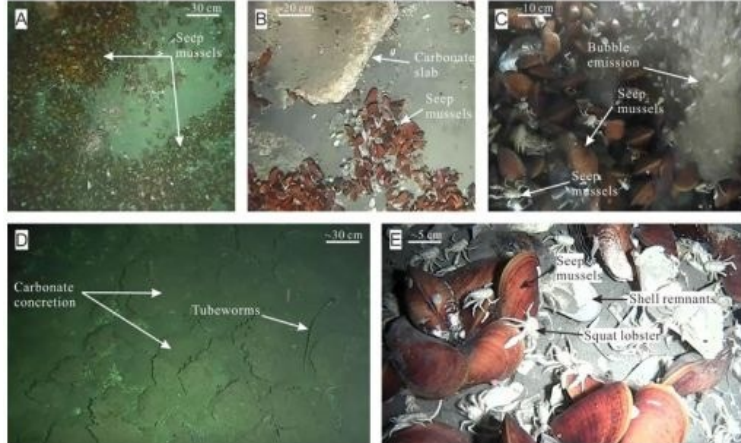


地球的“泥巴游戏”： 科学家发现海底泥火山喷发驱动新机制



(左)位于阿塞拜疆的巴赫哈尔卫星泥火山,中部有泥火山锥(“gryphons”)和水池。
(右)意大利的小型锥形泥火山锥,直径2米,可见石油渗漏。



泥火山附近海底观测结果:贻贝(A)、碳酸盐板(B)、气泡释放(C)、碳酸盐结核、管虫(D)、铠甲虾及贝壳残骸(E)

你喜欢在雨后的泥坑里踩水玩耍吗?那种泥浆飞溅的感觉确实很有趣。但你知道吗?我们脚下的地球更是个资深“泥巴爱好者”,只不过它玩的“泥巴游戏”更宏大、更神奇——当它“兴致大发”时,海底会冒出一座座泥火山,喷涌出带着油气的泥浆,就像在开一场热闹的“泥浆派对”。

今天,让我们潜入深海,揭开这场地球“泥巴派对”的神秘面纱。

地球的“泥巴玩具”:什么是泥火山?

对我们来说,泥巴是踩出快乐的童年玩伴;但对地球而言,泥巴却能变成会“喷发”的地质奇观——泥火山。

那么,什么是泥火山呢?它们是由泥浆、水和气体(主要是甲烷)组成的混合物,在地下高压推动下喷发到地表或海底形成的锥形构造。简单来说,就是地球内部的泥浆被压力“挤”出来形成的山丘。

与喷发岩浆的火山不同,泥火山的“燃料”不是熔融的岩石,而是饱含流体的泥浆,喷发起来相对温

和持久,就像海底在慢慢“吐泡泡”。1827年阿塞拜疆巴库的泥火山喷发是地质史上的标志性事件:当地居民目睹“天空升起火焰”,随后粘稠泥浆持续喷发超过20小时,最终堆出一座锥形泥丘。这一现象最初被误认为“火山爆发”,直到19世纪中叶才被归类为泥火山活动。

这一奇观不仅震撼了目击者,更成为推动非岩浆喷发机制研究的重要起点。此后,人们才开始真正探索泥火山的喷发机制。

地球的“常规玩法”:传统泥火山的形成

地球玩泥巴的“常规操作”,早就被科学家们深入研究。就像我们玩泥巴需要用力一样,地球让泥巴喷发也需要特定的地质条件。

在巴基斯坦的近海大陆边缘,地球采用的是“挤压模式”。2018年,中国地质调查局和巴基斯坦国家海洋研究所的调查发现,这里有12座海底泥火山整齐地站在东西走向的山脊上,高度从12~121米不等,直径能达到500至1400米。

在这里,阿拉伯板块正不断向欧亚板块“挤靠”俯冲,形成了东西走向的山脊,而泥火山就分布在这些山脊顶部。快速堆积的沉积物来不及压实,孔隙里的流体难以排出,在深部地层中逐渐积累形成“超高压环境”。这种超压像一只无形的手,推着深部富含流体的沉积物向上向上运移,成了泥火山形成的初始动力。

而在意大利半岛南部海域,地球采用了另一种方式。来自意大利海洋科学研究所的科学家发现,这里的泥火山下方藏着一个个向上拱起的“地下泥包”(科学家叫“泥底辟”,指未固结或弱固结的富泥质沉积物)。当泥底辟里的流体压力积累到超过上面岩层的“承受力”时,超压流体就会带着泥质沉积物沿着断裂或裂隙向上运移,最终喷出海底形成泥火山。

地球的“新花样”:东沙泥火山的独特机制

然而,传统机制在南海北部东沙群岛海区却“行不通”了。这里经历了强烈的构造隆升和沉积剥

蚀(即“东沙运动”)——地壳向上抬升,地层变薄,既没有板块挤压的“挤压力”,也没有厚沉积物的重压。这就是一场派对没了饮料,没了音响,热闹不起来了!但这并没有阻止地球在这里开展“泥浆派对”——它找到了新的玩法:利用地下的热能!

东沙泥火山下方的地壳深处,存在着地球的“天然加热装置”——岩浆。这些岩浆先在底部聚集(科学家称为“岩浆底侵”),像给地壳铺了层“地暖”;部分岩浆还顺着裂缝延伸,最深能到9公里,形成了贯通深部的“热通道”。

岩浆的加入这里的泥火山形成机制与众不同:

首先,岩浆向上涌升,先把地壳“顶”得鼓起来,地表裂开一道道缝,成了泥浆的“专属通道”;

其次,岩浆的热量加速了地下中生代地层中有机质的“加速成熟”,很快生成大量油气,使地层压力急剧增大;

最后,高压油气推动泥浆形成“地下泥包”,当压力足够大时,泥浆和油气就顺着裂缝喷上海底,堆

出一座座泥火山。

东沙群岛的“泥浆派对”,就这样以独特的方式上演!这场派对,还吸引了众多海洋生物前来“参加”。贻贝、管虫、铠甲虾等海洋生物都在泥火山周围建立了自己的家园。

地球的“泥巴游戏”不仅壮观,还具有重要的科学价值。泥火山喷出来的泥浆和油气,就像地球送给科学家的“礼物”,能有效帮助科学家找地下油气资源的藏身之处。东沙的泥火山也是如此:通过分析这些喷出物,科学家能更精准地定位深部的油气藏,为资源勘探提供重要线索。

从童年玩泥巴的乐趣,到全球尺度上的泥火山奇观,泥巴这一常见物质,在不同尺度上展现出完全不同的面貌。地球的“泥巴游戏”隐含着地质运动的密码,而东沙泥火山的独特形成机制,更让我们看到地球地质活动的多样性和创造性——它总能用新方式展现自然的力量,在深邃的海底留下一个个神奇的地质印记,等着我们去发现和解读。

月球背面的几粒砂, 见证了41.6亿年前的“大轰炸”

研究认为,这一时期的撞击是因为太阳系形成初期,大量小天体(如行星胚胎、陨石体)尚未建立稳定轨道,在太阳引力的牵引下彼此碰撞不断。而当时的小天体往往体积巨大,每一次撞击都可能带来翻天覆地的影响——甚至足以掀开行星的地壳,把深部物质抛洒到表面。

长久以来,晚期重轰炸被认为发生在38到40亿年前,一场持续时间不长但强度极高的撞击高峰期。由于这些痕迹在月球、火星、水星上都能观察到,科学家推测——地球也一定经历过类似的撞击洗礼。

只不过由于地球拥有大气、降水与板块运动等强烈地质过程,这些超古老的撞击痕迹早已被抹去。如今我们所能看到的陨石坑中,最古老的也不过是一些二十亿年前左右的大型陨石坑,它们成了地球早期遭遇剧烈撞击的幸存证据,也能让我们更好地理解为什么我们地球上不像其它岩质天体一样存在密密麻麻的陨石坑。

但最近,嫦娥六号带回的月球背面样本却给出了一个更古老的时间点:41.6亿年前。这一发现意味着:LHB的开始时间可能远早于我们此前的认知。如果这个推断成立,不仅仅是月球的撞击历史将被改写,整个太阳系的演化年表都可能因此发生重大调整。

一、嫦娥六号的采样点:月背的盆中之盆

嫦娥六号采回来的样本,来自一个特殊的“撞击嵌套区”——阿波罗盆地。这个直径约500公里的撞击坑本身就已经不小了,但更引人瞩目的是:它本身就处在一个更庞大的撞击盆地内部。这个更大的撞击结构,就是著名的南极-艾特肯盆地(South Pole-Aitken,简称SPA)。

SPA是目前太阳系中已知最大、最古老的撞击盆地之一,直径约2500公里,远远超过月球本身1737公里的半径,深度则在6.2至8.2公里之间,形成于大约42~43亿年前。这个盆中之盆的结构正是月球早期经历了多轮重大撞击事件的直接证据,也为我们研究太阳系之初的动荡岁月提供了天然的窗口。

正是因为阿波罗盆地所具有的科研潜力,科学家才选择了此地作为嫦娥六号的着陆点:南极-艾特肯盆地本身就极为古老,其形成过程有可能将月亮甚至月幔的物质暴露到地表,而阿波罗盆地则是由南极-艾特肯盆地形成之后发生的一次撞击导致,这就意味着阿波罗盆地内部成分可能极为复杂,可能既包括月亮壳物质、月幔物质、多次撞击形成的熔融物质,以及多次撞击再次抛洒出来的月球形成后

期的岩浆物质和历年来的风化物质,这些物质我们可能在嫦娥六号的这次采样中全部带了回来。

二、嫦娥六号的新发现

来自中国科学院、中山大学、香港大学等机构的研究团队对这些样品进行检查后,就发现了三块来自撞击熔融岩的微小岩石碎片,其大小仅有150~300微米。所谓的撞击熔融岩,指的是月球在被剧烈撞击时因高温而熔化,然后又迅速冷却形成的岩石。

在科学家们首先对这些岩石碎片中包含的锆石、磷灰石等矿物进行了同位素定年,发现它们的形成时间为41.6±0.014亿年前。

而更加引人注意的是它们的化学成分分析,它们呈现出非常典型的类KREEP的地球化学特征,所谓KREEP,是钾(K)、稀土元素(REE)、磷(P)的英文首字母组合。

要想理解KREEP,我们得回到月球刚诞生得时候。现在的主流认为,月球可能形成于一次地球与火星大小的天体忒伊亚的碰撞,碰撞后的大量残留物在轨道上再次碰撞并融合才形成了月球,这就导致月球最初整个都是一个岩浆球,其表面覆盖了一层深达数百公里的熔融岩浆海覆盖。

随着岩浆海开始冷却,其中的矿物开始按照密度和熔点顺序结晶并沉淀或漂浮。像橄榄石和辉

石这类较重的矿物首先结晶,沉到岩浆海底部,形成了月球的地幔。当岩浆海结晶到大约75%时,斜长石(一种相对较轻的矿物)开始大量结晶。由于密度较低,它们漂浮到顶部,形成了月球的原始地壳。

可是,并不是所有元素都愿意老老实实地进入矿物晶体。有一类叫做非相容元素的化学元素,它们在结晶过程中不容易被矿物结构吸收,于是被不断赶出已经形成的晶体,最终全部富集在剩下的那点岩浆残液中。而KREEP,就是这锅岩浆最后剩下的残余熔体,并被夹在了浮起的斜长岩壳和下沉的镁铁质月幔之间。

因此,KREEP在研究月球的演化历史和内部结构上对科学家极其重要。同时,由于KREEP富含放射性元素,如铀(U)和钍(Th)。这些元素在衰变过程中会持续释放出大量的热量。科学界普遍认为,正是由于月球正面富含KREEP,这些物质产生的热量让月球正面持续产生大规模火山活动,因此在月球正面形成了大面积的黑色平原,所以KREEP也是月球表面二分性的原因之一。

三、“类KREEP”的样本说明了什么?

而之所以说这些嫦娥六号的样本存在“类KREEP”特征,是因为它们与KREEP极其类似,具备相

似的化学元素特征,但却并不是原生的岩浆岩,而是具备撞击特征的撞击熔融岩——换句话说,它们原来是KREEP,但在一次强烈撞击后被重新熔化之后又冷却形成的。

科学家推测,这类KREEP岩石的起源可以分成两个阶段:第一个阶段是42~43亿年前的SPA撞击阶段,当时巨大的撞击可能深入到月幔,把深埋的KREEP物质熔化并重新抛出到地表。第二个阶段是约41.6亿年前的阿波罗陨石坑撞击阶段,这一阶段的撞击将这些KREEP物质重新熔融,最终形成了嫦娥六号带回来的这些样本。

因此,这类KREEP样本实际既记录了SPA撞击时的KREEP残余,又被阿波罗撞击重新加工,最后才保存至今。

这一结果至关重要,因为阿波罗陨石坑被认为是在晚期重轰炸开始后不久就形成的,因此这个样本相当于把晚期重轰炸事件的时间向前提到了至少41.6亿年前。这不仅改变了我们对月球和太阳系演化的认识,也对地球早期环境的研究意义重大。

因为地球在同一时期内必然也遭受到类似的撞击,如果撞击真的至少开始于41.6亿年前,而不是之前以为的40亿年前,那么地球早期的海洋、气候,以及生命起源的环境,可能都要在这个新的时间框架下重新审视。