

文章编号: 1000-0550(2003)04-0640-08

事件沉积及其周期性的氦同位素指示^①

叶先仁¹ 任建国^{1, 2} 陶明信¹ 王宗礼¹

1(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室 兰州 730000)

2(青岛海洋大学海洋地球科学院 山东青岛 266003)

摘要 物理、化学或生物事件所造成的事件沉积一般都会在沉积层中留下痕迹。事件沉积的突发性使得不同物源的物质比如稀有气体 He 在尚未达到平衡时就被保存在沉积地层中。海底沉积物中地球⁴He 的丰度受古大陆尘所支配,海底沉积物中的 He 主要源于³He/⁴He 比率不足 0.1 Ra 的大陆物质($Ra = 1.40 \times 10^{-6}$, 是空气的³He/⁴He 比率)和³He/⁴He 比率大于 100 Ra 的地球外星际尘粒。计算表明,亚洲风成尘粒总的质量累积速率(mass accumulation rate, MAR)与⁴He 通量之间有一个显著的相关性。由氧同位素变化所记录的冰期—间冰期循环的 100 kyr 周期的起始点与地壳⁴He 通量中 100 kyr 周期的起始点清晰地匹配。在大洋钻探计划中,用海底沉积物中地球外³He 的通量来考查星际尘粒的全球生长速率发现:³He 埋藏通量也与 100 kyr 冰期—间冰期循环周期相关。对白垩纪—第三纪界面(KTB)粘土中较高的地球外³He($[^3\text{He}]_{\text{Et}}$)计算,发现该界面事件的短期性。来自中国梅山和日本西南部 Sasayama 的二叠纪—三叠纪界面(PTB)富勒烯的 He 同位素限定了这种富勒烯形成于地球外环境。在整个宇宙体系中,各物源之间的 He 及其同位素组成存在着很大差异,这为解析沉积事件提供了新的高灵敏度的手段。

关键词 事件沉积 氦 同位素 示踪

第一作者简介 叶先仁 男 1966 年出生 副研究员 地球化学

中图分类号 P597 **文献标识码** A

一般把具有突发性和瞬时性的沉积过程称为事件沉积(event deposits; depositional events)。事件沉积可以分为四类:一是短期物理事件,包括陨石撞击事件、火山尘埃沉降事件和重力流沉积等;二是化学事件,主要指大气或水体化学性质的突然变化(表现为沉积物的元素地球化学和同位素地球化学特征的突变);三是生物事件,包括生物的间断演化和灭绝事件、集群死亡事件,生态及古地理的突然变化等;四是上述物理、化学和生物事件的复合事件^[56]。事件沉积既可以反映盆地内部的地质作用(自旋回沉积、局部因素控制的沉积),又可以反映外部的地质作用(区域或全球因素控制的沉积)。事件沉积往往在地层中重复出现,有时表现为周期性旋回的特点,有时则表现为非周期性的。海平面变化、厌氧事件、气候变化、古海洋的变迁、生物事件、造山作用、星际尘埃通量的增减和星际撞击灾变事件等都会在事件沉积层中留下痕迹。一般地,物源不同,其稳定同位素组成和元素地球化学特征也存在差异,因此,稳定同位素地球化学和元素地球化学方法用于沉积学研究一直受到人们的重视^[1, 21, 54~56]。近年来,沉积矿物中不同来源的稀有气体尤其是氦(He)的解析为确定沉积事件提供了新的高灵敏度的手段。

1 边界层事件的³He 指示

在 65 000 kyr 以前的白垩纪—第三纪界面(KTB)记录了大多数质量灭绝事件,虽然普遍认为这是地球外撞击事件所造成的^[2, 49],但撞击物的特征及其在 K-T 物种灭绝中的角色是有争议的。已有的研究表明撞击物可能是一个单个小行星或彗星^[2, 49, 24]或一组彗星雨^[19]。地球外的撞击通过把大量的尘埃和活性受气候影响的气体注入进大气层,可能严重干扰了地球的生态系统和气候。另一个用来解释生物灾难的假定是大量的火山作用^[34]。近期的工作^[16]表明大多数溢流玄武岩喷发于于 KTB 重合的 < 1 000 kyr 的时间段中。广泛的火山作用给全球环境带来的影响与大撞击的影响可能相似,但二者的时间尺度可能是不同的:撞击对气候和生态系统的干扰在地质学上可能是瞬间的,但来自火山的影响可能要达至少数十年。

KTB 粘土是一个特殊的界面层,典型的有数厘米厚。深入研究粘土的沉积间隔,可以找到界面处物种灭绝和气候变化的原因与速率的重要线索,但大多数地质年代学工作不适合于此目的。这个时间段的估算是建立在假定的基础上的:KTB 粘土沉积速率与周围

① 国家自然科学基金(批准号:40173006)和气体地球化学国家重点实验室开放基金(2002-03WMB)资助。

古磁场记录的石灰石中的粘土是一样的^[29]。这个假设在这样一个扰动时间段是有问题的。旋回地层学限定了 KTB 前后的沉积速率^[14]，但不能应用到粘土自身。因此 KTB 的持续时间是不确定的，估算范围从数千年到数十万年^[14]。这里可以使用地球外 He 来较好地描绘 KTB 撞击和与粘土有关的沉积间隔。

星际尘粒把高³He 浓度 ($[^3\text{He}]$) 和高³He/⁴He 比率积累到深海沉积物中^[35]。地球外物质具有比地球物质高的³He/⁴He 比率，它们之间的差异可以用来建立地球外³He ($[^3\text{He}]_{\text{Et}}$) 在沉积岩中的浓度。

$[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 可以用关系式 $[^3\text{He}]_{\text{Et}} = f^3\text{He} \times r/a$ 来表示，这里 $f^3\text{He}$ 是地球外来源的增长速率， a 是沉积物 MAR， r 是描述 He 丢失的保存性参数 (介于 0~1 之间)。由于 $[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 被保存在沉积记录中至少 480 000 kyr^[37]，因此在所讨论的时间范畴内可以认为 r 是不变的。这样，在沉积层序中 $[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 受 $f^3\text{He}/a$ 的限定。

如果 $f^3\text{He}$ 是常量，则没有绝对年龄即可估算瞬时沉积速率。

在全球典型 KTB 粘土中，假定地壳的和地球外组分的端元³He/⁴He 比率分别为 0.03Ra 和 290Ra^[33]，则可以计算出 $[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 占总³He 的 86% 以上^[29]。在 $[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 的分布图中 (图 1)，平滑处理过的 $[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 从 344.5m (~ 65 500 kyr) 到 KTB 处的 348.5 m (~ 64 800kyr) 之间在 ±20% 之内是不变的，在 KTB 粘土层中增加，在第三纪的第一个石灰岩内又恢复到前 KTB 值。

$[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 与相对沉积速率呈相关性^[12, 28, 36]，比如图 1 中所示的沉积的非碳酸盐部分 (NCF) 和 $[^4\text{He}]$ 。这种相关性暗示，在 63 900 ~ 65 400 kyr 之间，³He 的生长速率是不变的，沉积物中的 $[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 主要受控于碳酸盐 MAR 的变化。由此，KTB 粘土中较高的 $[^3\text{He}]_{\text{Et}}$ 是沉积速率降低的唯一的可能贡献。经过计算，KTB

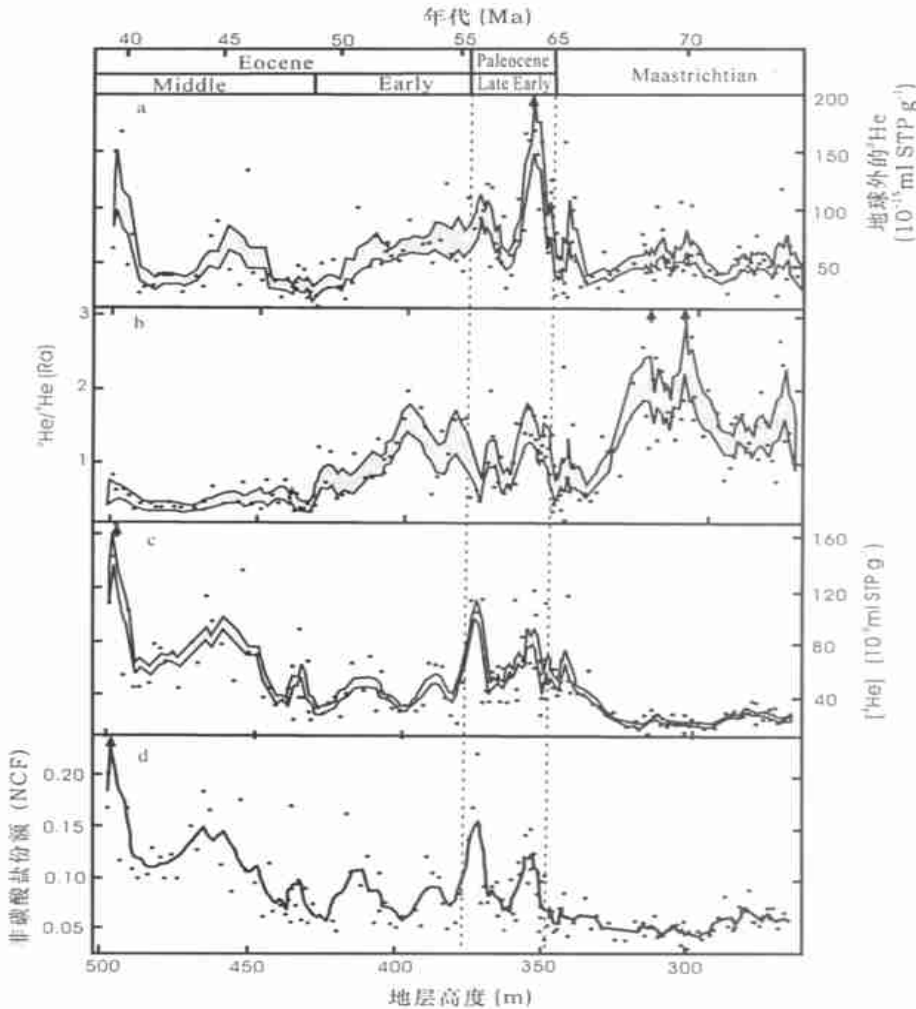


图 1 Gubbio 沉积物中 $[^3\text{He}]$ 、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $[^4\text{He}]$ 浓度和非碳酸盐份额 (NCF)。箭头表示数据点溢出^[28]
 Fig. 1 $[^3\text{He}]$ (a), $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio (b), $[^4\text{He}]$ (c), and non-carbonate fraction (d) in the Gubbio sediments. Arrows represent data points that plot off scale^[28]

的沉积持续时间是 (10 ± 2) kyr, 表明了该界面事件的短期性。

最严重的物种灭绝事件记录于二叠纪—三叠纪界面(PTB) $(251\,400 \pm 300\text{ kyr})^{[10]}$, 该事件造成 90% 的海洋物种、70% 的地球脊椎动物和大部分陆地植物死亡^[41, 48, 52, 53]。新的研究表明, 这些灭绝事件比以前所想象的要突然得多^[7, 40], 估计灭绝时间范围为 50~8 kyr^[7, 40]。对 PTB 灭绝事件提出的灾难性假设包括小行星(或彗星)撞击或大量溢流玄武岩的火山作用^[44]。在 KTB 的物种灭绝与地球外物体的撞击有密切关系, 这得到 Ir 异常、冲击石英和微陨石等证据的支持。PTB 界面没有 Ir 异常^[45], 但可以由沉积物中的富勒烯所捕获的地球外来源稀有气体来示踪^[5]。

从冲击坑和界面粘土沉积物中得到的富勒烯含有与陨石和星际尘粒相似同位素组成的稀有气体^[3, 4]。这种富勒烯好象形成一个地球外的环境中。在日本东部 Inuyama 的 PTB 沉积物中也报道过富勒烯, 它与超级泛古陆上的广泛大火相关联^[4, 5], 随后在超级泛古洋缺氧的深部海底上成藏。

来自中国梅山和日本西南部 Sasayama 的 PTB 界面富勒烯的 He 同位素组成位于行星型范围内 $(1.6 \times 10^{-4} \sim 1.9 \times 10^{-4})^{[4, 5]}$ 。在 Sasayama 沉积物中, 总³He 实际上在界面处减少, 而富勒烯和富勒烯包笼的³He 的浓度却增加超过了 50 倍。富勒烯包笼的³He 几乎占了全沉积物中总³He 的 50%, 而界面上下的仅不足 1% (图 2)。在界面处这种独特的³He 信号的量变指出了一个无关联的事件, 与连续的 IDP 源沉积于深海沉积物所形成的信号是不同的^[13, 25]。

界面处测定的⁴⁰Ar/³⁶Ar 比率也证明了富勒烯的地球外起源^[4, 5]。如果这种行星型气体储藏于富勒烯形成的时候, 则³He/³⁶Ar 的比率好象更接近于碳质球粒陨石中出现的比率^[4, 5] (图 3)。Ne 同位素比率也支持行星型气体储藏——尽管证据不是那么充分有力^[5]。根据富勒烯包笼稀有气体时与气体的分压函数关系^[47], 可以知道其形成环境中 He 的分压相当于 2~4atms。只有星球或崩塌的气体云团才有这样的压力^[3], 并提供有助于富勒烯形成的环境(即, 具有较低的 H/C 比率)。

2 大陆尘埃的示踪剂—⁴He

海洋盆地中风成尘埃的质量累积速率(MAR)是大陆尘埃源的气候和运移尘埃的季风模式的一个重要记录。

沙漠是风成大陆尘埃的重要源, 这些尘埃可以从其源地被运移数千公里。控制尘埃供应的基本因素是源区的干燥性。另外, 大陆尘埃运送到深海盆地的速率通常与全球气候有关——正如海底沉积物中氧同位素所记录的^[17, 51]。由于深海盆地一般都远离大陆边缘, 河流和近海沉积的地壳物质可以忽略, 因此, 洋盆中风成尘埃的 MAR 记录了尘埃源区的气候变化及对尘埃运送做出贡献的季风模式^[8, 43, 51]。以前的研究已显示, 在太平洋西北部和中部的尘埃的优势源是中国中部和东部的沙漠^[17, 18, 23]。在过去 530 kyr 中, 北太平洋中风成尘埃的 MAR 显示出 100 kyr 的周期——这与氧同位素所记录的全球气候相关联, 因此高的尘埃通量与冰期紧密相连^[17, 18]。这种尘埃通量记

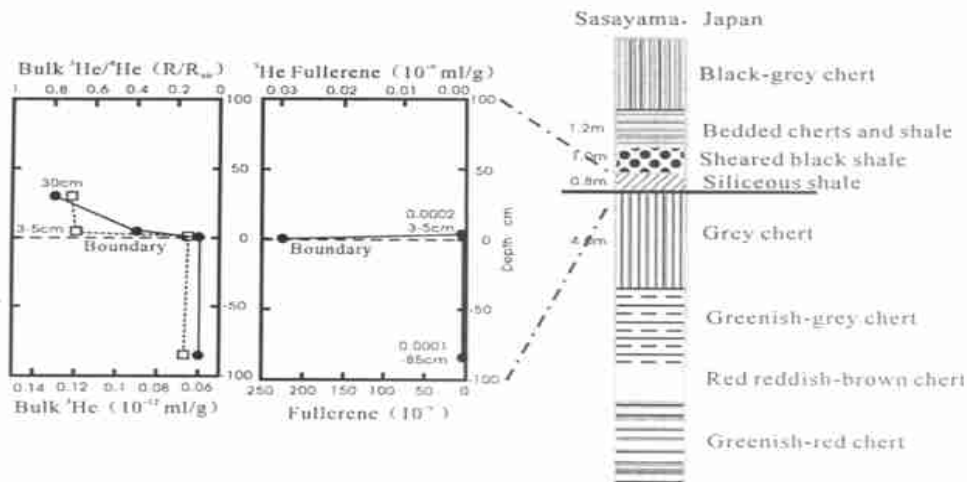
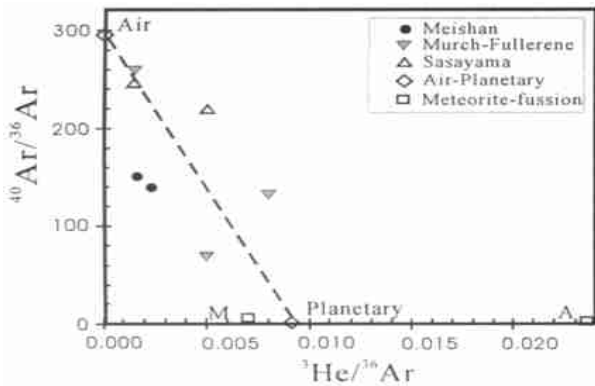


图 2 日本 Sasayama 剖面沉积物中测定的³He(实线)和³He/⁴He 比率(虚线)与富勒烯包笼的³He 和富勒烯含量的比较^[5]

Fig. 2 Measured ³He (solid line) and ³He/⁴He (dashed line) in the bulk sediments compared to the fullerene-encapsulated ³He and fullerene content at Sasayama^[5]



该图表明了大气(295.5, < 0.001)与行星(< 1, 0.01)组分之间的混合趋势。图中也绘出了富勒烯组分抽提之后对 Murchison(M) 和 Allende(A) 碳质球粒陨石酸溶残留物的测定结果^[5]

图3 在 PTB 沉积物和 Murchison 中测定的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比率与 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 比率的关系图

deposits and Murchison indicates a mixing trend between atmospheric (295.5, < 0.001) and planetary (< 1, 0.01) components. Also plotted are the bulk acid residues for the Murchison (M) and Allende (A) carbonaceous chondrites after extraction of the fullerene component^[5]

Fig. 3 A plot of the measured $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios versus the $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ ratios in PTB

录被认为反映了亚洲沙漠的干燥性变化与 100 kyr 周期的冰期—间冰期的气候循环有关, 因为在间冰期期间干燥度会增加。不同的是, 来自赤道的太平洋中心的大陆尘埃通量记录表现得较为复杂, 表明尘埃输送到赤道太平洋中部也受到诸如信风热带辐合区 (Inter-Tropical Convergence Zone, ITCZ) 的纬度位置等因素的影响^[43]。

检测海底沉积物中大陆尘埃丰度的传统技术是通过化学侵蚀提取非自生的、非生物的、结晶的组分并称量残留物。不过, 这种方法通常受到火山灰的干扰, 因为火山灰在侵蚀过程中会继续存在并模糊了大陆尘埃的质量累积。因此, 在这样的样品中的大陆尘埃的鉴定需要详尽的矿物学和地球化学的分析以消除各种端员的相对贡献^[23]。这个问题在西部太平洋中是特别敏感的, 那里由于邻近太平洋边缘的火山弧, 区域火山尘的供应量可能高出源于沙漠区的大陆尘埃的供应量达数个数量级。由此, 关于亚洲尘埃的供应或 ITCZ 在西部赤道太平洋于过去地质期间的可能影响便存在诸多不确定性。为此, 人们探讨使用地壳 ^4He 对海底沉积物的输送速率作为古老大陆尘埃的 MAR 的指标, 它不受其它陆源组分的加入影响。

风成亚洲尘埃有一个超过 $2\,000 \times 10^{-9}$ ml/g 的 ^4He 含量^[13], 而火山灰和地面熔岩 (来自相关火山弧的消减) 通常有不足 5×10^{-9} ml/g 的 ^4He 含量。

这样, 海底沉积物中地球 ^4He 的丰度将受古大陆尘所支配, 对火山物质的混入是不灵敏的。

海底沉积物中的 He 主要源于 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比率不足 0.1 Ra 的大陆物质和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比率大于 100 Ra 的地球外星际尘粒^[35, 50]。那么, 沉积物中观测的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比率就是这两种组分的混合比率的反映。如果已知这些端员的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比率, 则沉积物中地壳 ^4He 的量就可以使用简单的二元混合模式从观测的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比率中计算:

$$^4\text{He}_{\text{地壳}}/^4\text{He}_{\text{总量}} = \left[\left(^3\text{He}/^4\text{He} \right)_{\text{观测值}} - \left(^3\text{He}/^4\text{He} \right)_{\text{星际尘粒}} \right] / \left[\left(^3\text{He}/^4\text{He} \right)_{\text{地壳值}} - \left(^3\text{He}/^4\text{He} \right)_{\text{星际尘粒}} \right]$$

以前的 He 研究已显示海底沉积物中大气的 He 在这里是可以忽略的^[11]。这样, 地壳 ^4He 通量 (单位: $^4\text{He}/\text{面积}/\text{时间}$) 就可以通过乘以由沉积物 MAR (单位: 质量/面积/时间) 所计算的地壳 ^4He 的丰度 (单位: $^4\text{He}/\text{质量}$) 来测定^[11, 13, 50]。

在大洋钻探计划 (ODP) 中, 对赤道西太平洋中 Ontong Java Plateau 的东北边缘钻位 806B (澳大利亚东北部, $0^\circ 19.11' \text{N}$, $159^\circ 21.70' \text{E}$, 2 521 m 水深) 的沉积物岩芯中 He 的时间分布研究表明该方法的可行性及特有的优势。

图 4 给出了西北太平洋岩芯 V21-146 (日本东部, $37^\circ 41' \text{N}$, $163^\circ 02' \text{E}$, 3 968 m) 中亚洲风成尘粒总的 MAR 与 ODP 806B 的 ^4He 通量的比较。在这两组数据之间有一个显著的相关性: 它们都有一个 100 kyr 的变化周期, 且振幅和波相都非常匹配。

由海底沉积物中氧同位素所记录的风尘的 MAR 与全球气候之间的相关性在太平洋和大西洋中的某些位置报道过^[9, 43, 51]。特别是, Hovan 等以前曾提出在过去 530 kyr 间, 亚洲大陆尘的 MAR 中的 100 kyr 周期变化与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录相关^[17, 18], 因此高的尘粒通量与冰川最大化紧密相关。由于尘粒供应主要是尘源区的干燥度的函数^[27, 39, 42], 因此, Hovan 等提出了冰川最大化与亚洲沙漠的干燥度之间的直接联系, 后者是把风成大陆尘供应到西太平洋的主要控制因素——至少在过去 530 kyr 间是这样^[17, 18]。

图 5 给出了 ODP 806B 的地壳 ^4He 通量与 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的比较^[6]。这里使用平均值消除了氧同位素记录中的高频变化^[36]。对于具有与冰期最大化紧密相关的高通量的这个位置, 地壳 ^4He 通量与 $\delta^{18}\text{O}$ 气候记录之间存在非常好的相关性。而且, 在大约 700 kyr 前由氧同位素变化所记录的冰期—间冰期循环的 100 kyr 周期的起始点与地壳 ^4He 通量中 100 kyr 周期的起始点清晰地匹配。这表明与亚洲中部和东部沙漠的

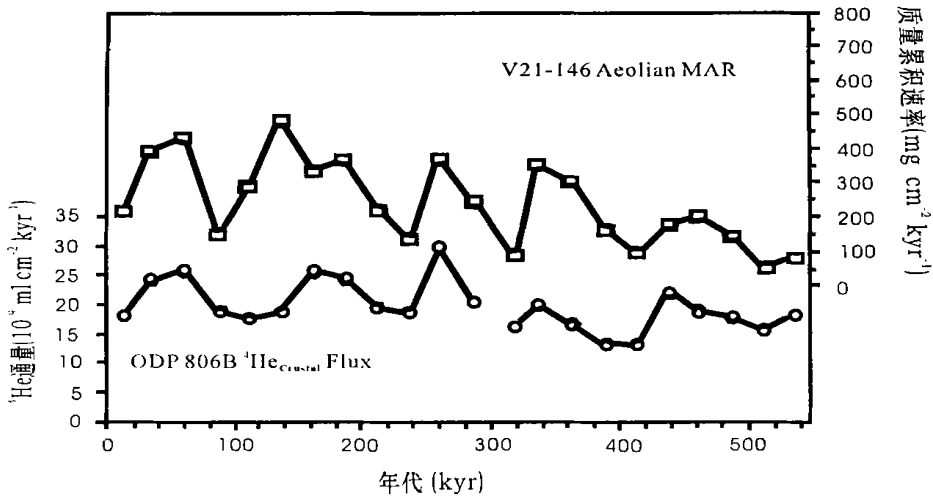


图4 ODP 806B 钻孔的地壳 ^4He (空心圆圈)与北太平洋岩芯 V21-146 处亚洲尘粒的总的 MAR(空心方框)的比较^[36]

Fig. 4 Comparison of crustal ^4He flux at ODP 806B (open circles) with the total mass accumulation rate of Asian dust at Core V21-146 in the north Pacific Ocean (open squares) ^[36]

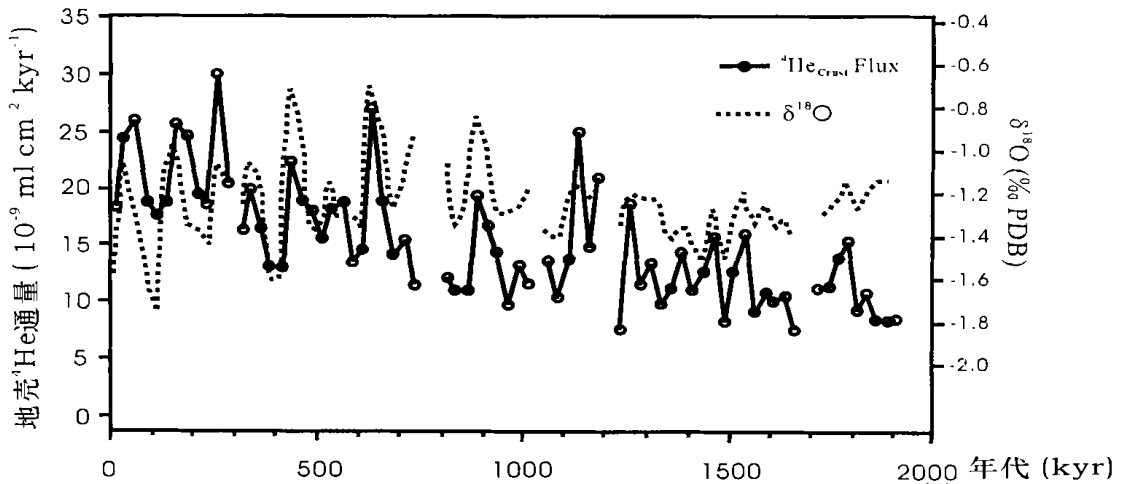


图5 ODP 806B 钻孔的地壳 ^4He 通量与同一岩芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录(PDB 标准)的比较^[36]

Fig. 5 Comparison of crustal ^4He flux ODP 806B with $\delta^{18}\text{O}$ record (PDB Standard) for the same core^[36]

干燥度变化有关的气候是控制风成亚洲尘供应的主要因素。 ^4He 通量的长期增加还可能反映了喜马拉雅在过去 4 000 kyr 间的抬升造成了亚洲中部干燥度长期增大的趋势^[17, 22, 23, 46]。

3 第四纪气候周期性变化的新指标——沉积物中地球外 ^3He 的埋藏通量

海洋和陆地沉积物、南极冰雪、黄土中均发现了散落到地表的地外物质诸如宇宙尘、磁性球粒、微玻璃陨石等。地外物质(包括宇宙尘、陨石、太阳风和彗星残片等)都富含 ^3He , 其 ^3He 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(分别为 $> 10^{-5}$ ml STP/g 和 $> 10^{-4}$)均要比地表物质高几个数量级^[55]。地外物质的溅入必然也将地外来源的 He 带入地球系统。实验研究表明:沉积物中地外物质可抵御海水的侵蚀、成岩和变质作用的改造而使地外 He 同位素的组成特征保存下来^[13]。因此, He 同位素不

但是撞击事件重要的地球化学指标,而且也为其诱发的环境灾变的研究提供新线索和研究途径。

气候指标记录的研究,比如海底碳酸盐沉积物中的氧同位素比率,提供了在地质历史中地球气候变化的详尽的图画。这些记录显示,自~1 000 kyr 以来,地球气候受 100 kyr 周期的冰期—间冰期循环所主导,而在其之前,冰川循环的周期是 41 kyr。虽然地球轨道离心率影响气候的机理尚不清楚,但 100 kyr 气候周期传统上与地球的轨道离心率的周期变化是紧密相关的。离心率模式的另一种说法是:100 kyr 的气候循环是地球轨道相对于太阳系运动平面的倾角变化的响应^[30~32]。

对于这种倾角变化的假设,可以用海底沉积物中地球外 ^3He 的通量作为星际尘粒的全球生长速率的指标来考查^[13, 35, 50]。在大西洋中脊 41°N 的侧翼实施的深海钻探计划(DSDP)研究中,钻位 607 的 ^3He 埋藏

通量显示了与氧同位素气候记录一致的 100 kyr 变化周期, 高³He 埋藏通量出现在间冰期^[11]。另外, ³He 埋藏通量显示了与地球轨道的离心率和倾角二者的合理的相关性。在大西洋的沉积物中观测到的这种现象也在西赤道太平洋 Ontong Java Plateau 处海洋钻探计划的海底碳酸盐沉积物中得到了体现, 说明地球轨道的离心率和倾角变化对星际尘粒生长速率的影响具有全球性^[38]。

图 6 绘出了西赤道太平洋钻孔 806B 的平均地球

外³He 浓度与岩芯年龄的关系。在 ~700 kyr 开始, ³He 埋藏通量具有一个大约 100 kyr 的变化周期。在 ~700 kyr 之前, 埋藏通量似乎没有系统地变化。傅立叶变换光谱分析也在 0~700 kyr 这个时间窗观察到强的谱峰(图 7), 而在 700 kyr 之前的³He 通量中却没有有意义的谱峰。在图 7 中, 0~700 ka 期间有 3 个谱峰强度较大的峰, 其周期约为 97 kyr、120 kyr、180 kyr。

在来自北太平洋深海粘土岩芯的研究中(GPC 3

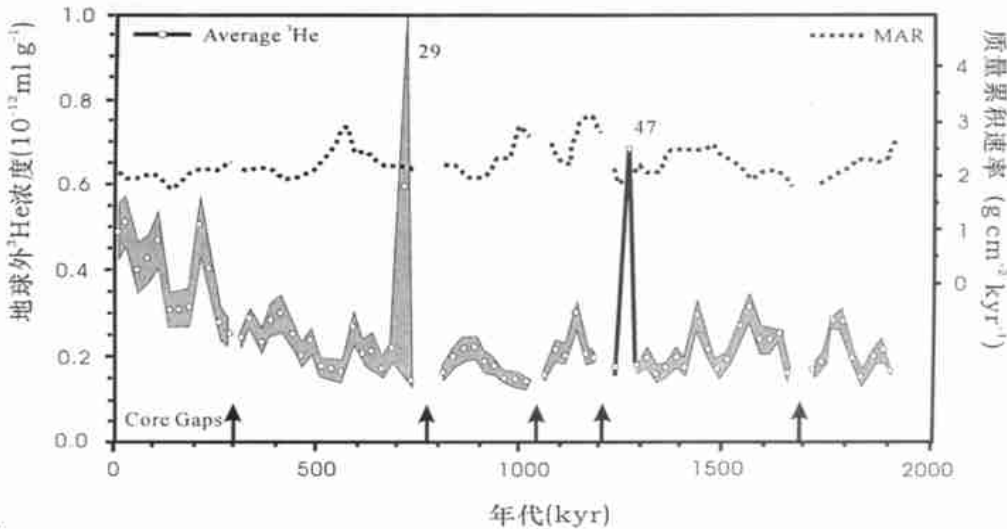


图 6 ODP 806B 钻孔中平均³He 浓度和总的沉积 MAR 与年龄的关系^[38]。

Fig. 6 Average ³He concentration and bulk sediment mass accumulation rate (MAR) as a function of age in ODP Core 806B^[38]

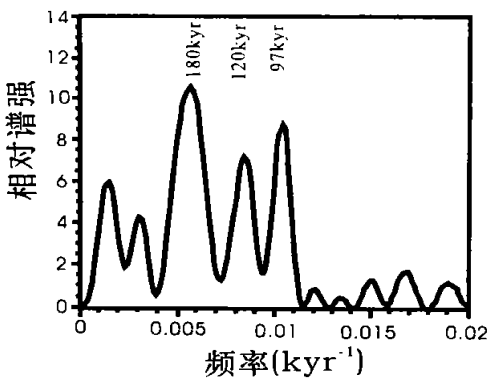


图 7 跨过 0 到 700 kyr 的³He 通量数据的快速傅立叶变换光谱^[38]

Fig. 7 Fast Fourier Transform of the ³He flux data across the window 0 to 700 kyr^[38]

岩芯), Farley 测定了贯穿第三纪时期地球外³He 埋藏通量的平均值是 $0.48 \times 10^{-12} \text{ ml/cm}^2 \cdot \text{kyr}$, 变化于 $0.3 \times 10^{-12} \sim 0.6 \times 10^{-12} \text{ ml/cm}^2 \cdot \text{kyr}$ 之间^[13]。相比而言, 在第四纪期间的³He 埋藏通量是较高的: $1.0 \times 10^{-12} \sim 1.2 \times 10^{-12} \text{ ml/cm}^2 \cdot \text{kyr}$, 快速明显的增加出现在 ~1 000 kyr。相似的结果在文献^[11, 25, 50]中有报道。这些结果的一致性表明埋藏通量的明显升高

开始于 ~700 kyr。在过去 700 kyr 间, ³He 埋藏通量的增加可能是较古老沉积物中³He 的部分丢失所造成的^[38], 也可能反映了行星带中撞击率的增加或彗星活动的增强, 进而造成星际尘粒和³He 的增加。这种长期增加的趋势并没有掩盖其周期性变化。

地球各端元以及地球外物源之间的 He 含量和 He 同位素存在着巨大的差异, 这赋予了 He 独特的示踪作用。He 的这种示踪作用不仅可以用于地球各圈层的相互作用研究和大气演化的认识, 同样可以用于沉积事件的研究中。这为沉积学提供了新的研究手段。

参考文献(References)

- 1 Aharon P, Goldstein S L, Wheeler C W, *et al.* Sea-level events in the South Pacific linked with the Messinian salinity crisis[J]. *Geology*, 1993, 21: 771~775
- 2 Alvarez W, Asaro F, Montanari A. Iridium profile for 10 million years across the Cretaceous-Tertiary at Gubbio (Italy)[J]. *Science*, 1990, 250: 1700~1702.
- 3 Becker L, Poreda R J, Bada J L. Extraterrestrial helium trapped in fullerenes in the Sudbury impact structure[J]. *Science*, 1996, 272: 249~252
- 4 Becker L, Poreda R J, Bunch T H E. Fullerenes: an extraterrestrial carbon carrier phase for noble gases[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000,

- 97: 2979~2983.
- 5 Becker L, Poreda R J, Hunt A G, *et al.* Impact event at the Permian-Triassic boundary: Evidence from extraterrestrial noble gases in fullerenes[J]. *Science*, 2001, 291(5508): 1530~1533
 - 6 Berger W H, Yasuda M K, Bickert T, *et al.* Quaternary timescale for the Ontong Java Plateau: Milankovitch template for Ocean Drilling Program Site 806[J]. *Geology*, 1994, 22: 463~467
 - 7 Bowring S A, Erwin D H, Jin Y G, *et al.* U/Pb zircon geochronology and tempo of the end-Permian mass extinction[J]. *Science*, 1998, 280: 1039~1045
 - 8 Chuey J M, Rea D K, Piasis N G. Late Pleistocene paleoclimatology of the central equatorial Pacific: a quantitative record of eolian and carbonate deposition[J]. *Quaternary Research*, 1987, 28: 323~339
 - 9 Clemens S C, Prell W L. Late Pleistocene variability of Arabian Sea summer monsoon winds and continental aridity: Eolian records from the lithogenic component of deep-sea sediments[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5: 109~145
 - 10 Erwin D H. The Permian-Triassic extinction[J]. *Nature*, 1994, 367: 231~236
 - 11 Farley K A, and Patterson D B. A 100-kyr periodicity in the flux of extraterrestrial ^3He to the seafloor[J]. *Nature*, 1995, 378: 600~603
 - 12 Farley K A, Montanari A, Schoemaker E M, *et al.* Geochemical evidence for a comet shower in the Late Eocene[J]. *Science*, 1998, 280: 1250~1252
 - 13 Farley K A. Cenozoic variations in the flux of interplanetary dust recorded by ^3He in a deep-sea sediment[J]. *Nature*, 1995, 376: 153~156
 - 14 Herbert T D, D' Hondt S L. Precessional climate cyclicity in late Cretaceous-Tertiary boundary events[J]. *Earth Planet Science Letter*, 1990, 99: 263~275
 - 15 Heymann D. Buckminsterfullerene, its siblings, and soot-carriers of trapped inert-gases in meteorites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B13): E135~138
 - 16 Hofmann C, Feraud G, Courtillot V. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of mineral separates and whole rocks from the Western Ghats lava pile: further constraints on duration and age of the Deccan traps[J]. *Earth Planet Science Letter*, 2000, 180: 13~27
 - 17 Hovan S A, Rea D K, Piasis N G. Late Pleistocene continental climate and oceanic variability recorded in northwest Pacific sediments[J]. *Paleoceanography*, 1991, 6: 349~298
 - 18 Hovan S A, Rea D K, Piasis N G, *et al.* A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}\text{O}$ records: Aeolian flux to the north Pacific[J]. *Nature*, 1989, 340: 296~298
 - 19 Hut P, Alvarez W, Elder W B, *et al.* Comet showers as a cause of mass extinctions[J]. *Nature*, 1987, 329: 118~126
 - 20 Jin Y G, Wang Y, Wang W, *et al.* Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China[J]. *Science*, 2000, 289: 432~436
 - 21 Keller G, MacLeod N, Lyons J B, *et al.* Is there evidence for Cretaceous-Tertiary boundary-age deep-water deposits in the Caribbean and Gulf of Mexico[J]. *Geology*, 1993, 21: 776~780
 - 22 Kutzbach J E, Guetter P J, Ruddiman W F, *et al.* Sensitivity of climate to late Cenozoic uplift in Southern Asia and the American West: Numerical experiments[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 18393~18407
 - 23 Kyte F T, Leinen M, Heath G R, *et al.* Cenozoic sedimentation history of the central North Pacific: inference from the elemental geochemistry of Core LL44-GPC3[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 1719~1740
 - 24 Kyte F T. A meteorite from the Cretaceous/Tertiary boundary[J]. *Nature*, 1998, 396: 237~239
 - 25 Marcantonio F, Anderson R F, Stute M, *et al.* Extraterrestrial ^3He as a tracer of marine sediment transport and accumulation[J]. *Nature*, 1996, 383: 705~707
 - 26 Marcantonio F, Higgins S, Anderson R F, *et al.* Terrestrial helium in marine sediments: A provenance indicator. *Eos*, 1997, 78: F390
 - 27 Middleton N J. Effect of drought on dust production in the Sahel[J]. *Nature*, 1985, 316: 431~434
 - 28 Mukhopadhyay S, Farley K A, Montanari A. A 35 Myr record of helium in pelagic limestones from Italy: implications for interplanetary dust accretion from the early Maastrichtian to the middle Eocene[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65: 653~669
 - 29 Mukhopadhyay S, Farley K A, Montanari A. A short duration of the Cretaceous-Tertiary boundary event: evidence from extraterrestrial helium-3[J]. *Science*, 2001, 291: 1952~1955
 - 30 Muller R A, MacDonald G J. Glacial cycles and orbital inclination[J]. *Nature*, 1995, 377: 107~108
 - 31 Muller R A, MacDonald G J. Glacial cycling and astronomical forcing[J]. *Science*, 1997, 277: 215~218
 - 32 Muller R A, MacDonald G J. Simultaneous presence of orbital inclination and eccentricity in proxy climate records from Ocean Drilling Program Site 806[J]. *Geology*, 1997, 25: 3~6
 - 33 Nier A O, Schlutter D J. Helium and neon isotopes in stratospheric particles[J]. *Meteoritics*, 1990, 25: 263~267
 - 34 Officer C B, Hallam A, Drake C L, *et al.* Late Cretaceous and paroxysmal Cretaceous Tertiary extinctions[J]. *Nature*, 1987, 326: 143~149
 - 35 Ozima M, Takayanagi M, Zashu S, *et al.* High $^3\text{He}/^4\text{He}$ in ocean sediments[J]. *Nature*, 1984, 311: 449~451
 - 36 Patterson D B, Farley K A, Norman M D. ^3He as a tracer of continental dust: A 1.9 million year record of Aeolian flux to the west equatorial Pacific Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 615~625
 - 37 Patterson D B, Farley K A, Schmitz B. Preservation of extraterrestrial ^3He in 480-Ma-Old marine limestones[J]. *Earth Planet Science Letter*, 1998, 163: 315~325
 - 38 Patterson D B, Farley K A. Extraterrestrial ^3He in seafloor sediments: Evidence for correlated 100kyr periodicity in the accretion rate of interplanetary dust, orbital parameters, and Quaternary climate[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 3669~3682
 - 39 Prospero J M, and Tees R T. Impact of the North African drought and El Nino on mineral dust in the Barbados trade winds[J]. *Nature*, 1986, 320: 735~738
 - 40 Rampino M R, Prokoph A, Adler A. Tempo of the end-Permian event: High-resolution cyclostratigraphy at the Permian-Triassic boundary[J]. *Geology*, 2000, 28: 643~646

- 41 Raup D M. Size of the Permian-Triassic bottleneck and its evolutionary implications[J]. *Science*, 1979, 206: 217~218
- 42 Rea D K, Leinen M, Janecek T R. Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation[J]. *Science*, 1985, 227: 721~725
- 43 Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind[J]. *Review Geophysics*, 1994, 32: 159~195
- 44 Renne P R, Zhang Z C, Richards M A, *et al.* Synchrony and causal relations between Permian-Triassic boundary crises and Siberian flood volcanism[J]. *Science*, 1995, 269: 1413~1416
- 45 Retallack G J, Seyedolali A, Krull E S, *et al.* Search for evidence of impact at the Permian-Triassic boundary in Antarctica and Australia[J]. *Geology*, 1998, 26: 979~982
- 46 Ruddiman W F, and Kutzbach J E. Forcing of late Cenozoic northern hemisphere climate by plateau uplift in Southern Asia and the American West[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 18409~18427
- 47 Saunders M, Jimenez-Vazquez H A, Cross R J, *et al.* Stable compounds of helium and neon-He at the cost of C60 and Ne at the cost of C60[J]. *Science*, 1993, 259: 1428~1430
- 48 Sepkoski J J. Periodicity in extinction and the problem of catastrophism in the history of life[J]. *Journal of Geological Society of London*, 1989, 146: 7~19
- 49 Shukolyukov A, Lugmair G W. Isotopic evidence for the Cretaceous-Tertiary impactor and its type[J]. *Science*, 1998, 282: 927~929
- 50 Takayanagi M, Ozima M. Temporal variation of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio recorded in deep-sea sediment cores[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 12531~12538
- 51 Tiedemann R, Sarnthein M, Shackleton N J. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic $\delta^{18}\text{O}$ and dust flux records of Ocean Drilling site 659[J]. *Paleoceanography*, 1994, 9: 619~638
- 52 Vischer H, Brinkhuis H, Dilcher D L, *et al.* The terminal Paleozoic fungal event; Evidence of terrestrial ecosystem destabilization and collapse[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1996, 93: 2155~2158
- 53 Ward P D, Montgomery D R, Smith R. Altered river morphology in South Africa related to the Permian-Triassic extinction[J]. *Science*, 2000, 289: 1740~1743
- 54 孙明良, 陈践发. 真空电磁破碎器粉碎盐岩颗粒及稀有气体同位素组成测量的实验研究[J]. *沉积学报*, 1998, 16(1): 103~106. [Sun Mingliang, Chen Jianfa. Study on the salt deposit crushing by the vacuum-electric-breaker and measurement of noble gas isotope composition[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 103~106]
- 55 孙明良, 叶先仁. 固体样品中He、Ar同位素的质谱测定[J]. *沉积学报*, 1997, 15(1): 48~53 [Sun Mingliang, Ye Xianren. Measurement on He and Ar isotopic compositions in solid samples by mass spectrometry[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(1): 48~53]
- 56 王璞君, 刘万洙, 单玄龙, 等. 事件沉积: 导论 实例 应用[M]. 长春: 吉林省科学技术出版社, 2001. 18 [Wang Pujun, Liu Wanzhu, Shan Xuanlong, *et al.* Depositional Events: Introduction Example Application[M]. Changchun: Jilin Science & Technology Press, 2001, 18]
- 57 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 45 [Wang Xianbin. Noble gas isotope geochemistry and cosmochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989. 45]

Helium Isotope Tracing on Depositional Events

YE Xian-ren¹ REN Jian-guo^{1,2} TAO Ming-xin¹ WANG Zong-li¹

1(State Key Laboratory of Gas-Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

2(College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266003)

Abstract There are different marks on depositional events which are caused by physical, chemical, or/and biological events in the sediment sequences. The suddenness on event deposits will contain various materials from different sources into sediment sequences. Terrestrial ^4He abundance in the marine sediments is dominated by old continental dusts. Helium in seafloor sediments is predominantly derived from old continental material with lower $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio. It is shown by theoretical calculations that there is a considerable correlation between the bulk mass accumulation rates (MAR) of Asian Aeolian dust and ^4He flux in the ocean basins. The onset of 100 kyr glacial-interglacial cycling in the oxygen isotope record clearly matches with the onset of 100 kyr periodicity in the crustal ^4He flux. Testing the IDP accretion rate by using extraterrestrial ^3He flux in the samples from Ocean Drilling Program (ODP), It can be seen that the burial flux of extraterrestrial ^3He is also associated with glacial-interglacial cycles. The fact that a high extraterrestrial ^3He ($[^3\text{He}]_{\text{Et}}$) found in the Cretaceous-Tertiary boundary (KTB) clay implies a short duration of the KTB event. The high $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios found in the fullerenes from Meishan (China) and Sasayama (Japan) should reveal that the fullerene carriers are formed in an extraterrestrial environment. In the cosmos, the difference of helium content and isotopic composition in various sources and the high helium preservation in the seafloor sediments may provide a high sensitivity means for exploring depositional events.

Key words event deposition, helium, isotope, tracing