

洛川黄土堆积磁性地层界线附近 He 同位素异常

杜学青 王永红 任建国 叶先仁 鹿化煜*

(中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075; 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266003; 国家自然科学基金委员会, 北京 100085; 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心, 兰州 730000; 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 中国科学院研究生院, 北京 100049. * 联系人, E-mail: huayulu@nju.edu.cn)

摘要 粒径小于 10 μm 的宇宙尘含有较地表沉积物高的稀有气体同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值和 ^3He 浓度, 地表物质平均 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值不足 0.1 R_A (R_A 即 air ratio, 是大气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值, $R_A = 1.4 \times 10^{-6}$), 而宇宙尘的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值却大于 100 R_A . 因此, 沉积物中宇宙尘的加入可以从 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值反映出来. 本文以典型的洛川黄土剖面为研究对象, 对磁性地层 B/M 和 M/G 界线附近的样品进行了氦同位素测试, 以探索黄土堆积的宇宙尘纪录. 对 8 个样品的原岩样、提取的磁性矿物和石英颗粒分别进行了测试, 发现磁性矿物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值较陆壳的值高出了一个数量级, ^3He 和 ^4He 含量也均明显偏高, 特别是磁性矿物的 ^3He 浓度比石英颗粒高出了 2~3 个数量级, 比全岩部分高出了 1~2 个数量级. 这些结果表明, 洛川黄土中磁性矿物的高比率 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 可能是由于宇宙尘的注入引起的.

关键词 宇宙尘 氦同位素 洛川黄土 黄土高原

宇宙尘或宇宙尘埃, 是地球之外起源的微粒物质, 在太阳系内称为行星际尘埃, 通常指由各类小天体碰撞破碎形成的尘埃或星云凝聚残留在行星际空间的微粒物质^[1], 粒径在 10~30 μm 之间^[2], 包括太阳风粒子、陨石碎屑、行星际残骸, 这些物质以平均 3×10^7 kg/a 的沉降速率散落于地球^[3]. 大量宇宙尘降落到地表, 携带着丰富的宇宙信息, 同时也反映着宇宙环境. 一种类型的宇宙尘为极细微矿物颗粒组成的集合体, 形状不规则, 矿物组成与陨石相似, 元素丰度具有典型的地外物质特征, 被地球引力场捕获后堆积在地表, 在地质体中很难被发现^[4]; 另一类型的宇宙尘为消融型宇宙尘, 即陨石、流星、彗星等小天体高速通过地球大气层, 在降落过程中, 表面温度、压力骤增, 使表面物质不断气化、熔融, 形成尾随陨落体的烟尘, 在大气层中冷凝, 再沉降于地表. 消融型宇宙尘矿物成分、化学组成和结构、构造都反映出高温熔融与迅速冷凝的特征. 然而, 此类宇宙尘并没有保存宇宙尘的原始特征, 也不能反映宇宙尘的原始通量. 此外, 人们还把陨石和流星体通过地球大气层时由于烧蚀而溅射的碎屑也称为宇宙尘, 在地质体中发现的宇宙尘多为消融型宇宙尘^[4]. 而本文中所述的宇宙尘主要是指第一类型的宇宙尘, 即

行星际空间尘埃, 此类宇宙尘不间断的向地表沉降, 反映了宇宙空间的环境.

已有研究表明, 磁性矿物是地球外 He 元素可能的载体, 尽管有 50% 左右的 He 元素存在于非磁性物质中^[5]. 早在 1964 年, Merrihue^[6] 首次从深海沉积物的磁性物质检测出高浓度的 ^3He ($\sim 10^{-11}$ $\text{cm}^3\text{STP/g}$) 和异常高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 ($> 10^{-4}$), 并指出高比率的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比可能是由于宇宙尘的加入引起的. 此后, 众多关于 He 同位素的研究在深海沉积物中展开, 并得出深海沉积物中高浓度的 He 元素正是由于陆源沉积物与地球外物质混合所致^[7-12].

虽然陆地上宇宙尘的研究也相继开展, 但与深海沉积物相比, 其研究进展缓慢, 主要原因是宇宙尘颗粒小、含量少, 分选、鉴定和测试都非常困难, 没有找到有效的方法.

中国黄土高原的黄土堆积是保存最近 2.5 Ma 以来地外物质的陆相沉积物之一, 也是研究第四纪天文气候的良好载体. 黄土地层中已有发现宇宙尘的报道^[13], 并对 B/M 界线和 M/G 界线附近发生的天文事件进行了研究. 袁宝印等人^[14] 和李春来等人^[15] 分别在洛川剖面的 B/M 界线和 M/G 界线附近层位发现过微玻璃陨石, 并且发现 B/M 界线附近存在的磁化率

2006-10-12 收稿, 2007-04-19 接受

国家自然科学基金项目(批准号: 40173006, 40325007)、教育部科学技术研究重点项目(批准号: 03106)和国家基础研究发展计划(编号: 2004CB720506)资助

异常峰值与玻璃陨石赋存层位一致 [16]。此外, 吴锡浩等人 [17]、马配学等人 [18] 依据铈元素的丰度异常也认为第四纪黄土中 M/G 界线和 B/M 界线记录了天文事件。然而, 此类研究并没有直接揭示宇宙尘的变化。以前关于在黄土中找到宇宙尘实体的报道也受到了很大的质疑, 被认为是火山灰沉积 (Ahmed El Goresy, 个人交流, 2000)。因此, 黄土中是否保存宇宙尘还没有答案, 需要从其他的角度进行研究。我们以黄土地层 B/M 界线和 M/G 界线附近的黄土为研究对象, 通过对分组样品 He 同位素的测试, 探索黄土是否可以记录宇宙尘的降落。

1 采样与磁性矿物、石英颗粒的提取

对黄土高原研究较为深入的洛川黑木沟黄土剖面 [19] 进行采样, 取 B/M 界线上、下 5 个样品和 M/G 界线附近的 3 个样品, 每个样品重约 1 kg, 并分别对样品进行了磁性矿物和石英颗粒的提取。

提取磁性矿物主要采取化学与物理方法相结合的实验步骤。称取 100 g 样品, 加入 100 mL 10% 的 H₂O₂ 和 100 mL 10% 的 HCl 去除有机质和碳酸盐。待反应完全后, 加入 50 mL 20% 的 Na₂P₂O₇ 作为分散剂, 搅匀, 置于微波振荡器中振荡 1 h, 使其充分松散。再用套有塑料盒的磁棒搅拌样品数分钟, 取出, 用去离子水冲洗掉塑料盒上吸附的颗粒, 放入干净烧杯, 取出塑料盒中的磁棒, 用去离子水大力冲洗塑料盒, 使吸附的磁性细颗粒全部落入烧杯。重复以上步骤数次, 直至塑料盒上吸附的磁性矿物可以忽略不计。然后, 将提取出的磁性矿物在 40 °C 下烘干, 在显微镜下观察, 估算磁铁矿和磁赤铁矿的含量约为 60% 左右, 还

有一部分为石英颗粒和少部分长石等其他矿物 (图 1)。

在石英颗粒的分离过程中, 我们借鉴 Xiao 等人 [20] 的方法, 为了保证石英颗粒的 He 元素不流失, 盐酸和双氧水的浓度都降低到了 10%, 并且省略掉高温熔融样品的步骤。流程如下:

5 g 风干样品

- 1 加 50 mL 10% 的双氧水, 放置 12 h
- 2 加 50 mL 10% 的盐酸, 充分搅拌至反应完全
- 3 用去离子水在 9000 r·min⁻¹ 下离心清洗 3 次

提纯石英

- 1 用 100 mL 30% 的去游离氟离子的氟硅酸浸泡 3 日, 并不断搅拌
- 2 用去离子水在 9000 r·min⁻¹ 下离心清洗 3 次
- 3 加饱和硼酸 20 mL 放置 12 h
- 4 用去离子水在 9000 r·min⁻¹ 下离心清洗 3 次
- 5 在低于 100 °C 的温度下烘干样品

提纯后的石英

经过双氧水和盐酸处理、离心清洗、烘干后的样品基本去除了有机质、碳酸盐和铁氧化物; 经纯化处理后加入的氟硅酸, 在溶液中离解为弱氢氟酸和四氟化硅气体, 氢氟酸中的氟离子极易同长石晶体结构中的铝硅氧化四面体形成氟离子的络合物, 而石英则由于其牢固的硅氧四面体结构而受氢氟酸的影响较小。提纯后的石英颗粒中还含有一部分云母以及其他的少部分黏土矿物。

2 测试与结果

对原岩样、提取的磁性矿物和石英颗粒共三组样品分别进行测试, 包括测定 ³He/⁴He 比值和 ⁴He 含量。

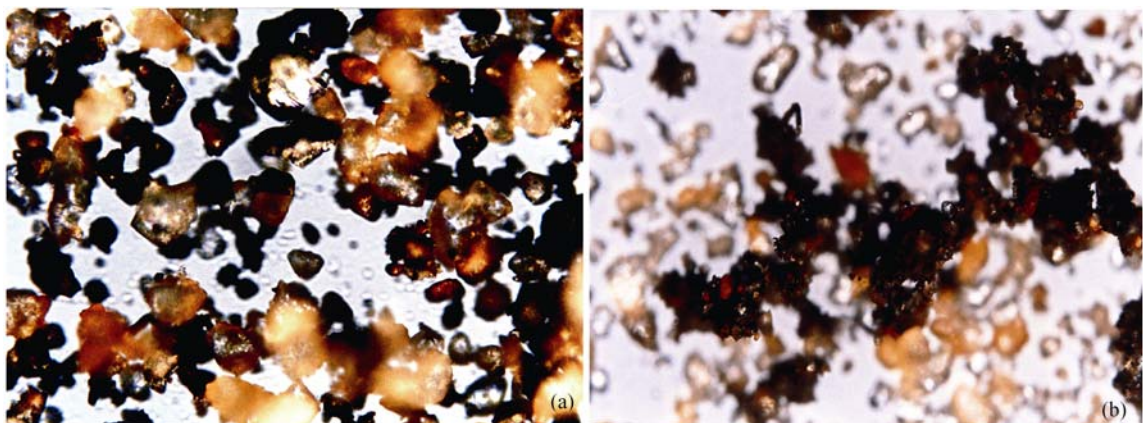


图 1 显微镜下磁性矿物形态

(a) 放大 40 倍; (b) 放大 20 倍

测试在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完成,所使用的仪器为英国生产的MM5400磁偏转静态真空质谱计.该质谱计主要由熔样系统、气体处理系统、质谱计主机、电控系统组成,配备有法拉第杯和电子倍增器双接收器,倍增器后端接有离子计数器.熔样炉最高温度可升至2000.气体处理系统由活性炭阱、海绵钛炉、Zr-Al吸气泵及连接管线组成.整个系统用不锈钢材料制成,可耐300的焙烤.经过加热去气后,质谱计主机动态真空可达 4.0×10^{-8} Pa以下,处理系统真空可达 5.0×10^{-7} Pa以下 [21].

国际公认的大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $R_A=1.4 \times 10^{-6}$,测试使用的标准样为兰州市郊区皋兰山顶端的空气.在分析中,采用“标准样—样品—标准样”的程序测试,每个样品分析之前,均进行热本底的测试.MM5400质谱计(1800)热本底值为: $^4\text{He}=1.3 \times 10^{-14}$ (单位为 mol).热本底的同位素组成接近于空气值.

由表1可以看出,同一个样品的测试结果, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值和 ^3He 、 ^4He 含量均是磁性矿物最高,全岩样次之,石英颗粒最低.有些样品磁性矿物较石英颗粒的 ^3He 含量高2个数量级, ^3He 的含量从 0.63×10^{-11} $\text{cm}^3\text{STP/g}$ 到 2.97×10^{-11} $\text{cm}^3\text{STP/g}$,与1964年Merrihue [6]首次从深海沉积物中的磁性矿物检测出高浓度的 ^3He ($\sim 10^{-11}$ $\text{cm}^3\text{STP/g}$)达到同一个数量级.磁性矿物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值在 $0.23\sim 0.83R_A$ 之间,典型陆壳岩石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 0.02×10^{-6} ($0.014R_A$) [22].磁性矿物高出地壳特征值1个数量级,与地幔 He ($^3\text{He}/^4\text{He} = 6R_A \sim 9R_A$)相比偏低 [23].

3 讨论与结论

自然界中 He 元素因其来源不同而具备明显不同的同位素比值 [24]. He 元素主要由3部分组成:()元素合成阶段形成的原始 He ,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比为 3×10^{-4} ,

地球内部深处幔源氦同位素的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值也较高,为 5×10^{-5} ;()宇宙射线与物质相互作用产生的宇宙成因 He ,使宇宙成因 He 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值高达 2×10^{-1} ;()放射性元素衰变及其诱发的核反应产生的放射性成因 He 元素,这些氦主要是由铀和钍系列元素的放射性衰变而产生的,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 2×10^{-8} [25].

作为氦同位素之一的 ^3He 是地球上原生的元素,地球演化过程中保存在地幔流体中的稀有气体,可通过火山活动、深大断裂等各种途径渗出地表,或混入温泉、热卤水及油气田中,也可能通过大陆壳深俯冲-折返过程,与幔源流体交换后带回地壳 [26~28].在地球成长的过程中, ^3He 只有很少量是放射性成因形成,且是由 Li 衰变而来的,因此放射性因素对地表 ^3He 的富集所作的贡献很小. ^3He 与 ^4He 比例的大小依赖于锂与铀、钍的相对含量,锂的衰变可以形成 ^3He ,核反应 $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}(\beta)^3\text{He}$ 形成 ^3He ,所以在含锂矿物中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值可高达 1.2×10^{-5} ; α 粒子衰变直接产生 ^4He ,即 U 和 Th ,等元素衰变可以产生 ^4He ,其量随着时间的增长而增长,在 U 和 Th 等元素丰富的岩土样品中,其增长速度较快,但是在 U 和 Th 等元素匮乏的岩土样品中 ^4He 基本处于一个恒定的量,陆壳岩石富含 U 和 Th 等放射性元素,使陆壳岩石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值普遍偏低,一般为 $n \times 10^{-8}$ [25].此外,宇宙射线照射下的宇宙尘每年却以一个可观的量降落到地表,其携带的 ^3He 在地层中保存时间至少为480 My之久 [29],影响着地表 ^3He 的储存量.由于宇宙成因 He 元素的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值可以高达 $n \times 10^{-1}$ [30],因此,很少部分的宇宙尘的加入即可造成地壳物质氦同位素的异常.

宇宙尘可以分为铁质、硅质和玻璃质3种类型,研究表明在铁质宇宙尘埃中宇宙成因氦是占优势的组分 [31,32].并且,黄铁矿具有很低的氦扩散系数 [33],

表1 黄土中原岩样、提取的磁性矿物和石英颗粒的He同位素分析

样号	地层层位	$^3\text{He}/^4\text{He}(R_A)$			$^3\text{He}/\times 10^{-11} \text{cm}^3\text{STP}\cdot\text{g}^{-1}$			$^4\text{He}/\times 10^{-6} \text{cm}^3\text{STP}\cdot\text{g}^{-1}$		
		全岩	磁性颗粒	石英	全岩	磁性颗粒	石英	全岩	磁性颗粒	石英
1	L6	0.29	0.83	0.039	2.19	2.97	0.10	5.38	25.63	1.90
2	L7	0.08	0.35	0.042	0.49	1.28	0.12	4.52	26.34	2.05
3	L8 ⁻¹	0.02	0.23	0.040	0.11	0.75	0.07	3.32	23.59	1.19
4	L8-2	0.20	0.45	0.081	1.48	2.74	0.21	5.40	43.01	1.86
5	L9	0.49	0.23	0.020	4.30	1.72	0.08	6.32	53.31	2.83
6	W3 ⁻¹	0.03	0.35	0.025	0.17	0.63	0.08	3.83	12.72	2.44
7	W3-2	0.49	0.54	0.025	6.44	2.10	0.10	9.45	27.73	2.78
8	W3-3	0.50	0.63	0.017	6.98	1.82	0.08	9.92	20.76	2.84

被认为是保存氦的理想矿物. 在 1985 年, Amari 和 Ozima^[34]的研究指出, He 的载体是球粒陨石(IDPs), 而分离出来的磁性矿物较高含量的 He 则是球粒陨石进入大气全过程中被加热形成的烧蚀产物. Matsuda 等人^[5]在对远洋沉积物样品进行研究后认为, 宇宙成因的 He 元素是太阳风的产物, 在进入大气圈的过程中被重新分配到矿物中, 并紧紧锁在颗粒内部. 1999 年, 中国科研人员对东太平洋海盆 C-C 区海底多金属结核及西太平洋马绍尔地区富钴结壳的 He 同位素组成进行了对比研究, 发现结核的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值普遍较高, 为 $(1.73\sim 13.26) \times 10^{-5}$ ^[35]. 以上研究认为, 在地表样品中检测出高含量的惰性气体同位素值, 常常是由于太阳风注入到宇宙物体中降落地球后的结果^[5,10].

在我们的测试结果中, 磁性部分的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值比陆壳值高出了至少一个数量级, 并且其 ^3He 及 ^4He 含量也都明显偏高, 特别是磁性部分的 ^3He 比石英部分高出了 2~3 个数量级, 比全岩部分也高出了 1~2 个数量级. 由于研究区黄土堆积后未经高温环境的改造, 也没有大的构造运动发生, 大规模混入地球原始气体的可能性并不大; 而且, 黄土中的 Li 元素的含量与陆壳平均值相当^[36]. 因此, 排除地幔物质和含锂矿物的混入, 其原因可能主要是由于宇宙物质的加入引起的. 但是, 在层位 L9 的全岩样 ^3He 浓度比磁性矿物的高, 可能的原因是, 这个时段是粉尘快速堆积的干冷气候期^[37,38], 粉尘颗粒含量要远远高于宇宙尘的含量, 并且这一层位的粉尘中磁性矿物受亚洲粉尘 ^4He 浓度较高特征^[12]的影响, 从而使 ^3He 浓度降低. 此外, 在测试结果中, 位于下粉砂层附近的 W3-2 和 W3-3 样品全岩样 ^3He 浓度也比磁性矿物偏高, 是否是同样的原因, 需要进一步研究.

将测试结果投影在 $^3\text{He}-^3\text{He}/^4\text{He}$ 关系图上(图 2), 磁性矿物、全岩样、石英颗粒的 He 同位素数据点均沿着宇宙尘与陆壳物质的混合曲线的趋势分布. 这可能表明三者的 He 同位素异常均是由于宇宙尘的加入引起的.

本次测试结果中 ^3He 浓度与从深海沉积物中的磁性矿物检测出高浓度的 ^3He ($\sim 10^{-11} \text{cm}^3 \text{STP/g}$) 相近, 都达到了 10^{-11} 的数量级. Ozima 等人^[8]测量了太平洋沉积物中磁性矿物样品中 ^3He 和 ^4He 浓度, 得出 ^3He 浓度与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 相关, 如果 $^3\text{He}/^4\text{He} > 5 \times 10^{-5}$, 则可以断定有宇宙尘的加入. 然而本次测试结果 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值又比这一标准低了一个数量级, 这是因为 ^4He 浓度

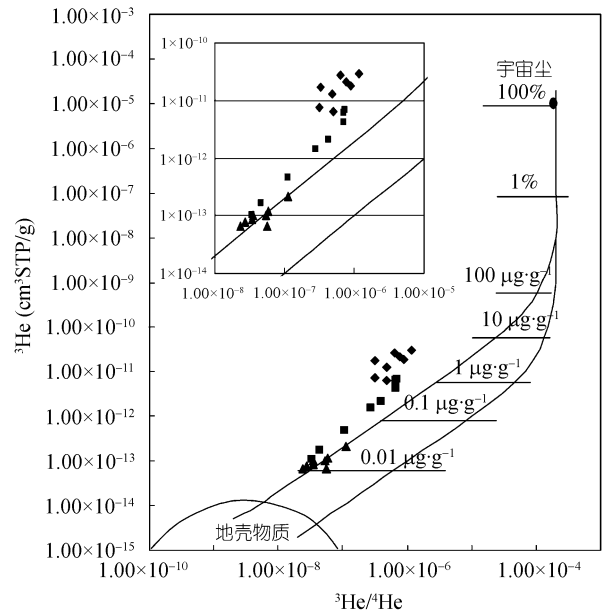


图 2 磁性矿物、石英颗粒、原岩样的 ^3He 含量与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的关系

示磁性矿物; 示石英颗粒; 示全岩样; 曲线为宇宙尘与陆壳物质的混合线; 曲线上的数字为沉积物中宇宙尘的含量

较高所引起. 陕西黄土中元素 U 和 Th 的平均含量分别为 3.61 和 12.6 $\mu\text{g/g}$ ^[39], 而大陆地壳 U 元素和 Th 元素的平均含量分别为 2.7 和 9.6 $\mu\text{g/g}$ ^[40].

粒子衰变直接产生 ^4He , 沉积源区中 U 和 Th 等元素的微小增加就可以导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的明显降低. 黄土样品中 ^4He 浓度相对偏高的原因可能是由于黄土中 U 和 Th 等元素相对陆壳丰富所致, 这就导致了磁性矿物 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值较深海沉积物磁性矿物低一个数量级的原因. 黄土中明显偏高的 U 和 Th 含量会产生大量的放射性成因 ^4He , 进而使初始的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值变低, 但我们得到的结果还是远高于典型壳源物质的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值. 因此, 可以认为, 有额外的 ^3He 源补充而提高了 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, 并且外加源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值很高, 可能就是宇宙尘加入.

黄土是大面积地表物质的混合, 可能指示了地球表层元素特征的平均状态, 与地壳的元素平均值相当^[39]. 在黄土堆积磁性地层界线上层位磁性矿物的高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值, 可能指示了黄土地层对宇宙尘注入的记录. 因此, 中国黄土堆积是否记录了第四纪宇宙事件的变化, 值得更深入研究.

致谢 野外和实验室工作得到兰州大学孙东怀教授、华东师范大学王晓勇博士、中国科学院地球环境研究所蔡演军

博士等的帮助;中国科学院南京天文台徐伟彪研究员给予有意义的建议;审稿专家提出了宝贵的意见,特此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 欧阳自远. 天体化学. 北京: 科学出版社, 1988. 273
- 2 Fraundorf P. The distribution of temperature maximal for micro-meteorites decelerated in the Earth's atmosphere without melting. *J Geophys Res*, 1980, 7: 765—768
- 3 Love S G, Brownlee D E. A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science*, 1993, 262: 550—553
[\[DOI\]](#)
- 4 欧阳自远. 陨石、宇宙尘研究对认识地球演化的几点启示. *地球科学进展*, 1989, 5: 1—4
- 5 Matsuda J, Murata M, Nagao K. He and Ne isotopic studies on the extraterrestrial in deep-sea sediments. *J Geophys Res*, 1990, 95(35): 7111—7117
- 6 Merrihue C. Rare gas evidence for cosmic dust in modern Pacific red clay. *Ann N Y Acad Sci*, 1964, 119: 518—520
- 7 Farley K A, Patterson D B. A 100 kyr periodicity in the flux of extraterrestrial ^3He to the sea floor. *Nature*, 1995, 378: 600—603
[\[DOI\]](#)
- 8 Ozima M, Takayanagi M, Zashu S, et al. High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio in ocean sediments. *Nature*, 1984, 311(4): 448—522
[\[DOI\]](#)
- 9 Takayanagi M, Ozima M. Temporal variation of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio recorded in deep-sea sediment cores. *J Geophys Res*, 1987, 92: 12531—12538
- 10 胡中为, 徐伟彪. 宇宙尘的源和鉴别依据. *紫金山天文台台刊*, 1989, 8(2): 109—120
- 11 Nier A O, Schlutter D J, Brownlee D E. Helium and neon isotopes in deep Pacific Ocean sediments. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54: 173—182
[\[DOI\]](#)
- 12 Farley K A. Cenozoic variation in the flux of interplanetary dust recorded by ^3He in a deep-sea sediment. *Nature*, 1995, 376(13): 153—156
[\[DOI\]](#)
- 13 赵济湘, 肖永林, 祝一志. 西安附近马兰黄土中的宇宙尘. *科学通报*, 1995, 40(1): 58—61
- 14 袁宝印, 赵慧敏, 张家云. 黄土中微玻璃陨石的发现及其意义. *科学通报*, 1989, 34(22): 1725—1728
- 15 李春来, 欧阳自远, 刘东生, 等. 黄土中微玻璃陨石和微玻璃球的发现与意义. *中国科学 B 辑*, 1992, (11): 1210—1219
- 16 李春来, 林文祝, 欧阳自远. 黄土中 0.73 Ma BP 微玻璃陨石赋存层位地球化学——磁化率特征. *科学通报*, 1994, 39(14): 1309—1311
- 17 吴锡浩, 徐和聆, 邓寄温, 等. 新近系-第四系界面撞击事件研究的新进展. *地质力学学报*, 1996, 2(1): 8—16
- 18 马配学, 侯泉林, 柴之芳, 等. 陕西段家坡黄土剖面中布容/松山古地磁界线附近异常地发现及其启示. *地质学报*, 1998, 72(2): 173—177
- 19 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 48
- 20 Xiao J L, Porter S C, An Z S, et al. Grain size Quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Chinese Loess Plateau of central China during the last 130000 yr. *Quat Res*, 1995, 43: 22—29
[\[DOI\]](#)
- 21 叶先仁, 吴茂炳, 孙明良. 岩矿样品中稀有气体同位素组成的质谱分析. *岩矿测试*, 2001, 20(3): 174—178
- 22 Ozima M, Podosek F A. *Noble Gas Geochemistry*. New York: Cambridge Univ Press, 1983. 367
- 23 Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 4663—4673
- 24 Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits. *Nature*, 1987, 329: 429—432
[\[DOI\]](#)
- 25 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学. 北京: 科学出版社, 1989. 7—11
- 26 张文山. 湘东北长沙-平江断裂动力变质带的构造及地球化学特征. *大地构造与成矿学*, 1991, 15(2): 100—109
- 27 丁清峰, 孙丰月. 地幔流体研究进展. *地质科技情报*, 2001, 20(3): 21—27
- 28 孙丰月, 石准立. 试论幔源 C-H-O 流体与大陆板内某些地质作用. *地学前缘*, 1995, 2(1-2): 167—174
- 29 Patterson D B, Farley K A, Schmitz B. Preservation of extraterrestrial ^3He in 480-Ma-old marine limestones. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 163(1-4): 315—325
[\[DOI\]](#)
- 30 Anderson D L. Helium-3 from the mantle: primordial signal or cosmic dust? *Science*, 1993, 261: 170—176
[\[DOI\]](#)
- 31 Poreda R J, Becker L. Fullerenes and interplanetary dust at the Permian-Triassic boundary. *Astrobiology*, 2003, 3: 75—90
[\[DOI\]](#)
- 32 Farley K A. Extraterrestrial Helium in Seafloor Sediments: identification, characteristics, and accretion rate over geologic time. In: Peucker-Ehrinbrink B, Schmitz B, eds. *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*. New York: Kluwer, 2001. 179—204
- 33 Baptiste P J, Fouquet Y. A bundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at 13°N. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 87—93
[\[DOI\]](#)
- 34 Amari S, Ozima M. Search for origin of exotic helium in deep-sea sediments. *Nature*, 1985, 317: 520—522
[\[DOI\]](#)
- 35 李延河, 李金城, 宋鹤彬. 海底多金属结核和富钴结合的 He 同位素对比研究. *地球学报*, 1999, 20(4): 378—384
- 36 邢光熹, 朱建国. 土壤微量元素和稀土元素化学. 北京: 科学出版社, 2003. 27—29
- 37 鹿化煜, 安芷生, 刘洪滨, 等. 洛川黄土记录的最近 2500ka 东亚冬夏季气候组合模式. *地质论评*, 1998, 44: 553—558
- 38 Lu H Y, Liu X D, Zhang F Q, et al. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan central Chinese Loess Plateau. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1999, 154: 237—246
[\[DOI\]](#)
- 39 文启忠, 刁桂仪, 耿安松, 等. 中国黄土地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 36—114
- 40 中国科学院贵阳地球化学研究所. 简明地球化学手册. 北京: 科学出版社, 1977