

月球表面天然放射性元素 Th 的分布特征及 月球化学的原始不均一性

李泳泉^{1,3*}, 刘建忠², 欧阳自远^{1,2}, 郑永春², 李春来²

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 月球 KREEP 岩石形成于壳幔的分界层中, 天然放射性元素 Th 是指示 KREEP 岩分布的主要元素之一。在月球正面, Th 元素含量高的区域主要分布在西部的月海区, 包括雨海和风暴洋及其附近地区, 而在月球背面 Th 含量高的地区为雨海对峙区以及南极爱特肯地区。高地的 Th 含量相对较低。现代月球表面 Th 的分布特征与 3.85 Ga 年前的雨海事件有重要的关系, 且在月球正面还发现了椭圆形的高 Th 含量区域, 是月球上特殊的地球化学省, 与月球初期的化学成分分布的不均一性有关。

关键词: 钍; KREEP 岩; 雨海事件; 不均一性; 月球

中图分类号: P148; P184 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2006)03-0221-06

Natural radioactive thorium distribution at the lunar surface and its primary inhomogeneity of chemical composition

LI Yong-quan^{1,3*}, LIU Jian-zhong², OUYANG Zi-yuan^{1,2}, ZHENG Yong-chun² and LI Chun-lai²

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

3. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: KREEP rocks formed at the boundary of lunar crust and mantle, and natural radioactive thorium is one of the elements to demonstrate KREEP rocks distribution. On the nearside of Moon, high Th concentration areas mainly locate at the west part of mares, including Mare Imbrium and Oceanus Procellarum and nearby region. On the farside, high Th concentration areas locate at the antipode region of the Mare Imbrium and South Aitken. On the lunar highlands surface, Th concentration is relatively low. The thorium distribution at the lunar surface is significant related with Imbrium impact event occurred before 3.85 Ga. There exists high-Th oval region on the nearside, which is a special geochemical province in lunar surface, and it's related with the primary lunar crust inhomogeneity of chemical composition.

Key words: thorium; KREEP rocks; Imbrium impact event; inhomogeneity; moon

0 引言

KREEP 岩是月球表面分布的一种特殊岩石, 因其富含元素 K、REE、P 而得名。许多学者研究认为^[1-5], KREEP 岩形成于月球的壳幔边缘, 为月球

后期岩浆演化的结晶产物。由于天然放射性元素 ²³²Th 的离子半径较大, 不易进入到早期的结晶岩石中, 而留在后期结晶的残留物中, 因此 KREEP 岩中富含天然放射性元素 Th。研究 Th 元素的分布特征对于研究月球的形成与演化有重要的意义。

收稿日期(Received): 2005-10-10; 改回日期(Revised): 2005-12-09; 接受日期(Accepted): 2005-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(40573047, 40232026, 40243019)

作者简介: 李泳泉(1982-), 男, 博士研究生, 地球化学及天体化学专业。

* 通讯作者(Corresponding author): LI Yong-quan, E-mail: liyongquan@bao.ac.cn, Tel: +86-10-64888774

LI Yong-quan et al.: Natural radioactive Th distribution at the lunar surface

1 遥感探测 Th 元素的全月分布特征

1.1 遥感探测获取 Th 元素的绝对丰度

迄今为止,对月球表面元素的定量探测主要有 Apollo 15, Apollo 16, Lunar Prospector (LP) 携带的伽马射线谱仪以及 Clementine 携带的成像光谱仪。天然放射性元素和因宇宙射线激发的元素都能发射出不同的 γ 射线能谱,通过探测不同的能谱可以定性地获取月表中的元素类型,然后通过探测器中的计数器计算在一定的时间内,获取元素发射的光子数,得到 γ 谱的流量,由此反演月表元素的含量。

2.6 MeV 伽马射线能量谱主要为天然放射性元素 ^{232}Th 衰变产生的^[6], LP 上携带的伽马射线谱仪能很好地辨别 Th 的特征谱线,在绕月过程中,伽马谱仪获取的计数率随月表特征的变化而变化^[4]。由于 Th 基线特征在整个月表都有较大的变化,且很少有其他元素的特征 γ 射线处于这样的能谱范围,因此可以采用下面的公式计算 Th 的绝对丰度:

$$C_{\text{Th}} = A_{\text{Th}} \alpha \varepsilon F_{\gamma}$$

式中: C_{Th} 为探测器的计数率; A_{Th} 为 Th 的绝对丰度; α 为伽马谱仪的有效面积; ε 为伽马射线在 2.5 ~ 2.7 MeV 能量窗口的探测率; F_{γ} 为每 $\mu\text{g/g}$ 的 Th 预计在卫星飞行高度的伽马射线流量,可以用以下的表达式计算:

$$F_{\gamma} = n_{\text{Th}} \Gamma / [2\mu(1 + h/R)^2]$$

式中: n_{Th} 为单位体积 (cm^3) 的 Th 原子数, 4.02×10^{15} 个/ cm^3 ; Γ 为 Th 元素发射伽马射线几率, 5.6×10^{-19} ; μ 为 2.6 MeV 伽马射线在月球表面的吸收系数,一般取 0.0613/cm; h 为卫星飞行高度; $R = 1738$ km 为月球半径。

1.2 Th 元素的全月分布特征

Apollo 绕月伽马射线谱仪测得的实验结果表明,在月球表面不超过 20% 的区域相对富集 Th 等元素,主要分布在雨海 (Mare Imbrium) 和风暴洋 (Oceanus Procellarum) 及其附近地区^[7], Th 的含量可达 20 $\mu\text{g/g}$; 而低含量的 Th 主要分布在月球高地区域, Th 的含量一般为 0.2 ~ 1.5 $\mu\text{g/g}$, 在 Van de Graaff 撞击坑周围的高地区域 Th 含量一般小于 2.7 $\mu\text{g/g}$ ^[7-14]。LP 探测的结果显示^[4], 在月球正面, Th 元素的最高含量分布区域位于雨海盆地中的哥白尼坑 (Copernicus) 附近以及 Apollo 14 着陆点弗拉

摩洛哥建造区 (Fra Mauro), 位于 27°W, 10°E。雨海东部的亚平宁山脉 (Apennine) 附近以及雨海西部和西北部的高地区域, Th 的含量也较高。在风暴洋地区, 尽管 Th 含量没有雨海周围和弗拉摩洛哥建造区高, 其 Th 含量相对整个月表含量也较高。在东部的月海区 (澄海、静海、危海) Th 的含量较低, 危海地区的 Th 含量和周围高地区域几乎没有差别。在月球背面 Th 含量高的区域位于南极爱特肯 (South Aitken) 地体以及雨海对峙区。图 1 为 Th 元素的全月分布图^[15]。

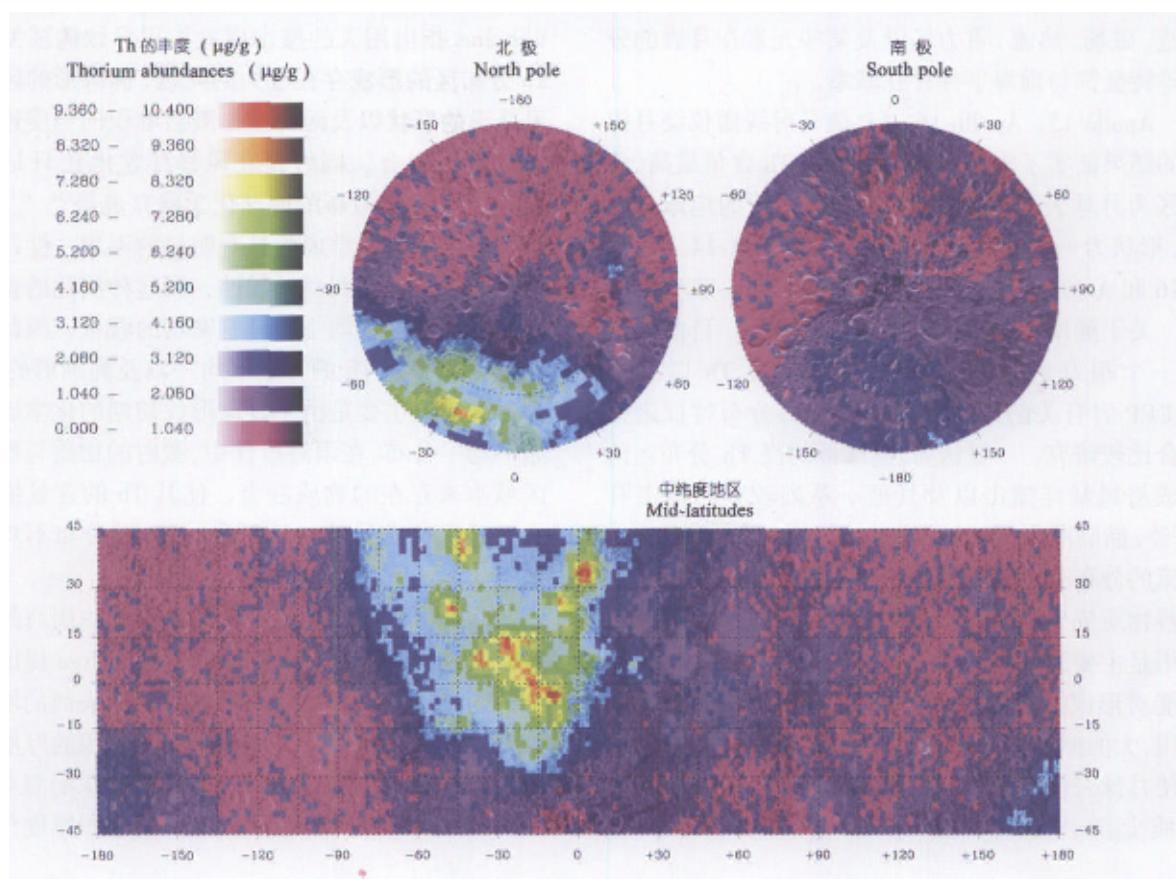
2 不同月岩和月壤中 Th 的分布

研究表明, Th 含量较高的岩石为铁镁质撞击熔融角砾岩, Th 含量一般大于 3 $\mu\text{g/g}$, Apollo 14 有些岩石中 Th 含量高达 17 $\mu\text{g/g}$ ^[16]。在 Apollo 16 着陆点 Cayley 平原, 29% 的表层月壤由铁镁质撞击熔融角砾岩组成^[17], Apollo 17 着陆点超过 50% 铁镁质撞击熔融角砾岩组成轻月幔堆积物^[18], 也是 Apollo 15 着陆点亚平宁山前堆积物的重要组成部分。由于此类岩石比 KREEP 玄武岩更富集 Th, 因此铁镁质撞击熔融角砾岩是高地月壤 Th 元素的主要载体^[17-19]。大多数的铁镁质撞击熔融角砾岩是撞击成盆作用的产物, 通常认为这些熔融的角砾岩在撞击过程中一般会机械地混入一些火成 KREEP 岩。

大多数 Apollo 采集到的玄武岩样品放射性元素 Th 含量较低, 一般 0.1 ~ 1 $\mu\text{g/g}$, 只有 Apollo 14 高铝玄武岩和 Apollo 11 高钾玄武岩中的 Th 含量相对较高, 可达 3 $\mu\text{g/g}$, 但雨海地区年轻的玄武岩中的 Th 含量高, 这与 Apollo 15, Apollo 16 以及 LP 伽马射线谱仪的探测结果一致^[4, 14, 20]。

长石质角砾岩 (feldspathic breccias) 由变粒和撞击熔融碎屑组成, 主要成分为苏长岩和橄长钙长岩, 这类岩石是组成月球高地表面的主要岩石类型, Th 含量低, 一般为 0.1 ~ 0.7 $\mu\text{g/g}$ 。

月壤由于其多来源性, 因此 Apollo 和 Luna 计划中采集得到的样品中, Th 含量差异性不大, 月海区的月壤 Th 含量一般为 0.5 ~ 1 $\mu\text{g/g}$, 而高地月壤中, Th 含量一般为 0.3 ~ 2 $\mu\text{g/g}$ ^[21]。Apollo 12 (12032, 12033) 月壤中由于富含 KREEP 成分, Th 含量可达 10 $\mu\text{g/g}$, 位于 Apollo 16 登陆点 Cayley 平原的月壤, 与 Apollo 15 和 Apollo 17 非月海月壤类似, 但不是典型的高地月壤, 由于其中含有铁镁质撞击熔融角砾岩的成分, Th 含量较高, 可达 3 $\mu\text{g/g}$ 。

图 1 Th 元素的全月分布图 (据 Lawrence *et al.* [15])Fig. 1 Distribution of thorium abundances of global lunar surface (from Lawrence *et al.* [15])

3 月球陨石中 Th 的分布

月球陨石是月球岩石在遭受月外天体撞击时候被抛射出月球, 由于受地球引力的作用而落在地球上的陨石 [22], 研究其不相容元素 (Th) 的分布特征, 对于了解陨石的来源有重要的意义。我国是世界上仅次于美国和日本的第三个陨石大国, 已经发现有著名的吉林陨石、广西南丹铁陨石、新疆陨石、随州陨石、亳县陨石和宁强陨石, 在南极科考中已经发现有火星和灶神星陨石, 但没有发现月球陨石的报道 [23-28]。迄今为止, 已在南极、冷和热带沙漠内发现约 36 个月球陨石, 按其岩性和组成可分为三类:

(1) 角砾岩化斜长岩, 高 Al_2O_3 (26% ~ 36%), 低 FeO (3% ~ 6%) 和低的不相容元素 ($<1 \mu\text{g/g}$, Th);

(2) 玄武岩和角砾岩化玄武岩, 中等的 Al_2O_3 (8% ~ 10%), 高 FeO (18% ~ 22%) 和中等的不相容元素 (0.2 ~ 2.1 $\mu\text{g/g}$, Th);

(3) 苏长岩质组成的冲击熔融角砾岩 (16% Al_2O_3 , 11% FeO), 具高的不相容元素浓度 (3 $\mu\text{g/g}$, Th) 类似阿波罗 KREEP 岩性。

有几个陨石为复矿碎屑角砾岩, 其组成介于斜长岩与玄武岩之间, 为富镁的非月海玄武岩系列 (苏长岩、橄长岩、纯橄榄岩、碱性斜长岩和 KREEP 岩), 它们是一个小的已知风暴洋 KREEP 岩层 (terrane) 月球的地球化学异常 (苏长岩质, 高的 Th) 区的产物, 一般认为本地长石质高地岩层则无此异常。SaU 169 月球陨石的富 Th 组分命名为 KREEP, 通过对风暴洋克里普地体中 Th 含量最高地区的撞击坑大小和形成年龄的分析, Gnos *et al.* 认为 SaU 169 月球陨石起源于月球上的 Lalande (4°S, 8°W) 撞击坑 [29]。

4 雨海事件与 Th 的分布

雨海 (Mare Imbrium) 盆地是月球正面最大的盆地, 直径约 1160 km, 也是月球表面仅次于东海 (Mare Orientale) 最年轻的盆地 [30], 对 Apollo 15 采集样品的研究表明, 雨海大约形成于 3.85 Ga。雨海事件是月球演化历史中的重要一环, 雨海盆地及其他的大型月海盆地 (静海、丰富海) 都是在雨海事件中由于大的行星体撞击产生的, 现代月球表面的地形

构造、磁场、热流、重力场以及某些元素在月表的分布等特征都与雨海事件存在联系。

Apollo 15, Apollo 16, LP 伽马射线谱仪绕月探测的结果证实了雨海及其周围地区 Th 含量最高,该地区为月球表面一个富含 Th 和铁镁质的地球化学省,形状为一个椭圆形^[18, 31-32],见图 2, A-14、A-15、A-16 和 A-17 分别代表不同时期的 Apollo 登陆点。

关于椭圆形的高 Th 分布区的形成,目前还没有一个很好的观点来解释,需要对 Th 以及与 KREEP 岩有关的其他元素在月表的分布特征进行综合比较研究。一般认为,椭圆形的高 Th 分布区的形成与风暴洋撞击以及其他一系列较小的撞击有关^[30],椭圆区内 Th 的变化可能与喷发 KREEP 玄武岩流的分布有关;Shervais *et al.* 讨论了月球后期的壳幔物质成分不均一性的问题,认为大的撞击成盆作用是主要原因^[33]。类似于撞击形成风暴洋的作用可能对形成椭圆形的高 Th 分布区具有重要的推动作用,大的撞击可以导致月球壳幔重新发生分异,甚至使月球壳幔物质倒转,使月球深部非“岩浆洋”的物质上涌,形成了椭圆形的高 Th 分布区。但

Wihelms 指出用大的撞击成盆作用导致椭圆形的高 Th 分布区的形成存在很大的问题,椭圆形的区域与风暴洋的形状以及雨海撞击溅射堆积的物质连续分布区域不吻合,同时存在风暴洋盆地还只是个假说^[34-35]。根据最新的地球化学研究成果^[36-42]地球特别是地壳的化学成分具有明显的不均一性,不同地体的演化具有明显差异性,而这种演化的差异性与地球化学的不均一性具有密切的联系,因此我们认为月球表面 Th 的分布不均一以及椭圆形的高 Th 含量区应该主要是由于月球形成初期的化学成分初始不均一分布,在雨海事件中,溅射的物质与椭圆形区域本来存在的物质混合,使其 Th 的含量依然较高,还保留着月球初始形成时 Th 的分布不均一特征。

雨海事件形成的堆积物厚度主要由雨海溅射的物质以及由其撞击形成的物质构成, Moss 提出的模型认为由雨海撞击形成的物质在月球表面的堆积厚度为 210 ~ 640 m^[43],在月球正面,堆积的厚度与距离雨海的距离成反比,而在月球背面,在雨海对峙区的位置,堆积厚度最大,其他地区的堆积厚度与距离

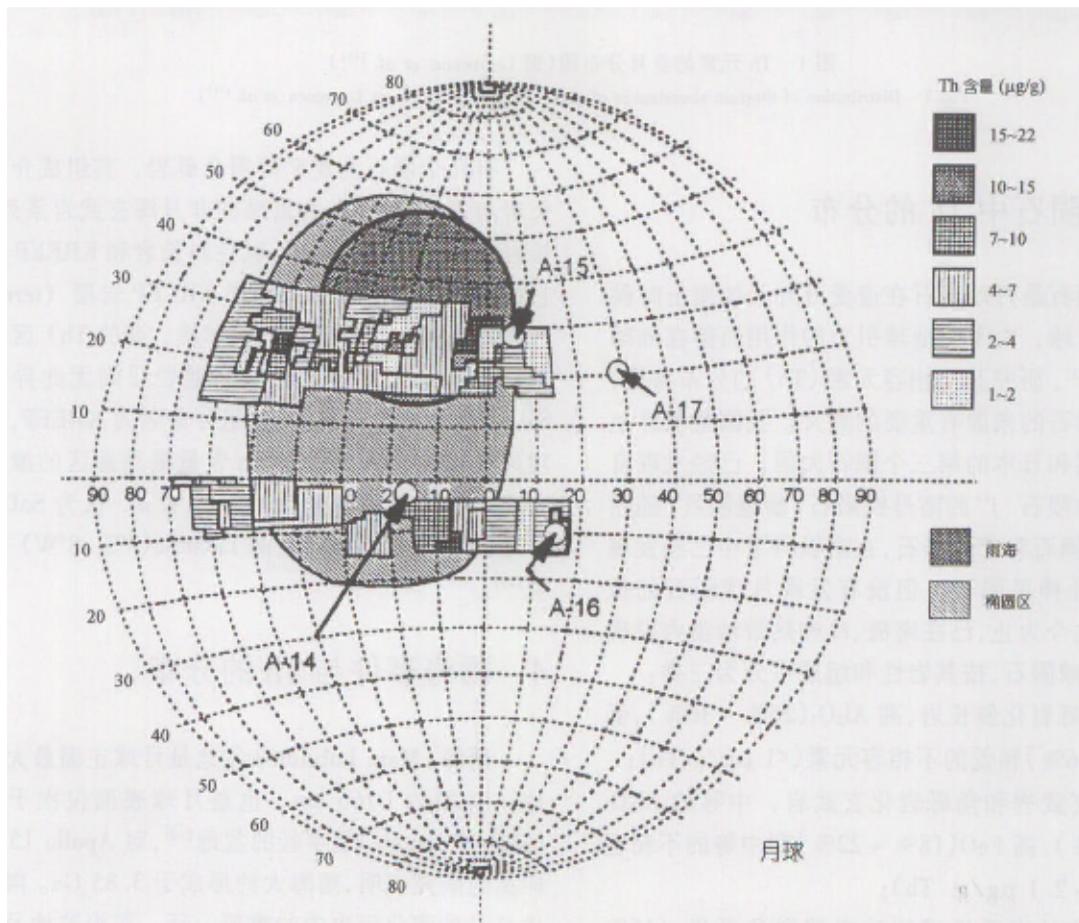


图 2 月球正面 Th 元素含量的分布图 (据 Haskin^[32])

Fig. 2 Distribution of thorium abundances of nearside of the moon (from Haskin^[32])

对峙区的距离有关, 距离对峙区越远, 堆积厚度越小。研究证实, 在月球正面, 随着距离雨海的距离增大, Th 的含量降低。远离椭圆形区域的月球高地, Th 含量很少超过 $4 \mu\text{g}/\text{g}^{[19]}$ 。在距离雨海中心超过 4 000 km 远的月球背面地区, 撞击形成的溅射物覆盖的厚度与月球的曲率有关, 在雨海的对峙区, 雨海溅射物堆积的厚度较厚, 因此 Th 的含量也高。

5 结 论

(1) 月球表面 Th 元素的分布呈现不均一的特征, 在月球正面, 高含量的 Th 主要分布在雨海以及风暴洋等月海区。

(2) 铁镁质撞击熔融角砾岩的 Th 含量最高, 其次是月海玄武岩, 含量最低的是月球高地斜长岩, 而月壤由于有不同程度的混染, 因此, 不同地区 Th 含量的分布特征差异性不大。

(3) 研究月球陨石的不相容元素 (Th) 的特性可以获取陨石的形成条件以及来源等信息。

(4) 雨海事件与 Th 元素的全月分布有重要的相关性, 月球表面 Th 的分布与雨海溅射的物质有关, 对 Apollo 采集的富 Th 铁镁质撞击熔融角砾岩的同位素年龄研究表明, 所有这些物质的年代与雨海事件的年代接近。

(5) 月球正面椭圆形富 Th 区的形成与月球早期的化学成分初始分布不均一性有关。

参考文献 (References):

- [1] Zou Yongliao, Xu Lin, Ouyang Ziyuan. KREEP rocks[J]. Chinese J Geochem, 2004, 23(1): 65 - 70.
- [2] Warren P H, Wasson J T. The origin of KREEP[J]. Rev Geophys Space Phys, 1979, 17(1): 73 - 88.
- [3] Warren P H. The magma ocean concept and Lunar evolution[J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 1985, 13: 201 - 240.
- [4] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, Binder A B, Elphic R C, Maurice S, Thomsen D R. Global elemental maps of the Moon: The Lunar Prospector gamma-ray spectrometer[J]. Science, 1998, 281(5382): 1 484 - 1 489.
- [5] Shervais J W, McGee J J. KREEP cumulates in the western lunar highlands: Ion and electron microprobe study of alkali-suite anorthosites and norites from Apollo 12 and 14[J]. Am Mineral, 1999, 84(5/6): 806 - 820.
- [6] Lederer C M, Shirley V S. Table of Isotopes(7th ed) [M]. New York: Wiley, 1978: 1 523.
- [7] Metzger A E, Haines E L, Parker R E, Radocinski R G. Thorium concentrations in the lunar surface. I - Regional values and crustal content[C]//Proceedings of the 8th Lunar and Planetary Science Conference, Vol. 1. New York: Pergamon Press, 1977: 949 - 999.
- [8] Metzger A E, Trombka J I, Peterson L E, Reedy R C, Arnold J R. Lunar surface radioactivity: Preliminary results of the Apollo 15 and Apollo 16 gamma-ray spectrometer experiments[J]. Science, 1973, 179(4075): 800 - 803.
- [9] Metzger A E, Trombka J I, Reedy R C, Arnold J R. Element concentrations from lunar orbital gamma-ray measurements[C]//Gose W A. Chemical and isotope analyses: Organic chemistry (Proceedings of the Fifth Lunar Science Conference). New York: Pergamon Press, 1974: 1 067 - 1 078.
- [10] Metzger A E, Haines E L, Etchegaray-Ramirez M I, Hawke B R. Thorium concentrations in the lunar surface: III. Deconvolution of the Apenninus region (in Early solar system and lunar regolith) [C]//Proceedings of the 10th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 1979: 1 701 - 1 718.
- [11] Metzger A E, Etchegaray-Ramirez M I, Haines E L. Thorium concentrations in the lunar surface: V. Deconvolution of the Central Highlands region[C]//Proceedings of the 12th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 1981: 751 - 766.
- [12] Bielefeld M J, Reedy R C, Metzger A E, Trombka J I, Arnold J R. Surface chemistry of selected Lunar regions[C]//Proceedings of the 7th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 1976: 2 661 - 2 676.
- [13] Haines E L, Etchegaray-Ramirez M I, Metzger A E. Thorium concentrations in the lunar surface: II. Deconvolution modeling and its application to the regions of Aristarchus and Mare Smythii [C]//Merrill R B. The Moon and The Inner Solar System (Proceedings of the 9th Lunar and Planetary Science Conference, Vol. 3). New York: Pergamon Press, 1978: 2 985 - 3 013.
- [14] Etchegaray-Ramirez M I, Metzger A E, Haines E L, Hawke R B. Thorium concentrations in the lunar surface: IV. Deconvolution of the Mare Imbrium, Aristarchus, and adjacent regions[J]. J Geophys Res, 1983, 88(suppl B2): A529 - A543.
- [15] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, Binder A B, Elphic R C, Maurice S, Miller M C, Prettyman T H. High-resolution measurements of absolute thorium abundances on the lunar surface[J]. Geophys Res Lett, 1999, 26(17): 2 681 - 2 684.
- [16] Wänke H, Baddenhausen H, Balacescu A, Teschke F, Spettel B, Dreibus G, Palme H, Quijano-Rico M, Kruse H, Wlotzka F, Begemann F. Multielement analyses of lunar samples and some implications of the results[C]//Proceedings of the 3th Lunar and Planetary Science Conference, Vol. 2. New York: Pergamon Press, 1972: 1 251 - 1 268.
- [17] Korotev R L. Some things we can infer about the Moon from the composition of the Apollo 16 regolith[J]. Meteorit Planet Sci, 1997, 32(4): 447 - 478.
- [18] Jolliff B L, Rockow K M, Korotev R L, Haskin L A. Lithologic distribution and geologic history of the Apollo 17 site: The record in soils and small rock particles from the highland massifs[J]. Meteorit Planet Sci, 1996, 31(1): 116 - 145.
- [19] Spudis P D, Pieters C M. Global and regional data about the Moon [M]//Heiken G H, Vaniman D, French B M, Schmitt H H. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 595 - 632.

- [20] Schaber G G. Lava flows in Mare Imbrium: Geologic evaluation from Apollo photography[C]// Brett R, Phinney W C, Strangway D W. Proceedings of the 4th lunar science conference: Mineralogy and petrology. New York: Pergamon Press, 1973: 73-92.
- [21] Korotev R L. Concentrations of radioactive elements in lunar materials[J]. J Geophys Res, 1998, 103(E1): 1 691-1 701.
- [22] Korotev R L. Lunar geochemistry as told by lunar meteorites[J]. Chemie der Erde - Geochemistry, 2005, 65(4): 297-346.
- [23] 王道德, Rubin A E. 我国九个普通球粒陨石的岩石学研究[J]. 地球化学, 1987, 16(4): 295-301.
Wang Dao-de, Rubin A E. Petrology of nine ordinary chondrites from China [J]. Geochimica, 1987, 16(4): 295-301 (in Chinese with English abstract).
- [24] 陈永亨, 孙用均. 新疆铁陨石多样品的微量元素分布及其在地球化学中的意义[J]. 地球化学, 1986, 15(3): 271-277.
Chen Yong-heng, Sun Yong-jun. Multisamples trace element distribution of Xinjiang iron meteorite and its geochemical implications[J]. Geochimica, 1986, 15(3): 271-277 (in Chinese with English abstract).
- [25] 陈江峰, Foland K A. 亳县陨石的微量元素研究 [J]. 地球化学, 1988, 17(1): 55-61.
Chen Jiang-feng, Foland K A. A study of trace elements in the Boxian (LL4) chondrite[J]. Geochimica, 1988, 17(1): 55-61 (in Chinese with English abstract).
- [26] 小沼直树, 野津宪沼, 西田仪正, 胁田宏, 武田弘, 长泽宏, 欧阳自远, 王道德. 中国安龙球粒陨石和南丹铁陨石的主要元素与微量元素的研究[J]. 地球化学, 1979, 8(1): 52-60.
Onuma N, Notsu K, Nishida N, Wakita H, Takeda H, Nagasawa H, Ouyang Zi-yuan, Wang Dao-de. Major and trace element compositions of two Chinese meteorites, Nantan iron and Anlung chondrite[J]. Geochimica, 1979, 8(1): 52-60 (in Chinese with English abstract).
- [27] 据宜太, 刘小汉. 格罗夫山地区陨石回收概况及展望[J]. 极地研究, 2002, 14(4): 248-251.
Ju Yi-tai, Liu Xiao-han. Meteorites collection in the Grove Mountains: Retrospect and prospect [J]. Chinese J Polar Res, 2002, 14(4): 248-251 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王鹤年, 王汝成, 张富生, 林承毅, 张文兰, 周丽娅. 南极 GRV 99027 陨石: 火星陨石中的一个新成员[J]. 极地研究, 2002, 14(4): 300-307.
Wang He-nian, Wang Ru-cheng, Zhang Fu-sheng, Lin Cheng-yi, Zhang Wen-lan, Zhou Li-ya. Antarctic GRV 99027 Meteorite: A new member in martian meteorite[J]. Chinese J Polar Res, 2002, 14(4): 300-307 (in Chinese with English abstract).
- [29] Gnos E, Hofmann B A, Al-Kathiri A, Lorenzetti S, Eugster O, Whitehouse M J, Villa I M, Jull A J T, Eikenberg J, Spette B, Krähenbühl U, Franchi I A, Greenwood R C. Pinpointing the source of a lunar meteorite: Implications for the evolution of the Moon[J]. Science, 2004, 305(5684): 657-659.
- [30] Wilhelms D E. The geologic history of the Moon[C]// USGS. USGS Professional Paper 1348. Reston: USGS, 1987: 302p.
- [31] Tera F, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm [J]. Earth Planet Sci Lett, 1974, 22(1): 1-21.
- [32] Haskin L A. The Imbrium impact event and the thorium distribution at the lunar highlands surface[J]. J Geophys Res, 1998, 103 (E1): 1 679-1 689.
- [33] Shervais J W, Taylor L A. Petrologic constraints on the origin of the Moon[C]// Hartmann W K, Phillips R J, Taylor G J. Origin of the Moon. Houston: Lunar Planet Inst, 1986: 173-201.
- [34] Cadogan P H. Oldest and largest lunar basin?[J]. Nature, 1974, 250(5464): 315-316.
- [35] Whitaker E A. The lunar Procellarum Basin[C]// Merrill R B, Schultz P H. Proceedings of the Conference on multi-ring basins: Formation and evolution. New York: Pergamon Press, 1980: 105-111.
- [36] 欧阳自远, 张福勤, 林文祝, 王世杰, 肖志峰, 李春来, 邹永廖, 欧阳歆凌, 刘朝晖. 行星地球的起源和演化模式——地球原始不均一性的起源及对后期演化的制约[J]. 地质地球化学, 1995 (5): 11-15.
Ouyang Zi-yuan, Zhang Fu-qin, Lin Wen-zhu, Wang Shi-jie, Xiao Zhi-feng, Li Chun-lai, Zou Yong-liao, Ouyang Xin-ling, Liu Zhao-hui. Origin and evolution of the planet Earth: Chemical heterogeneity of the Earth and its origin and evolution [J]. Geology-Geochemistry, 1995 (5): 11-15 (in Chinese).
- [37] 欧阳自远, 张福勤, 林文祝, 王世杰, 欧阳歆凌. 地球铅同位素早期不均一性及其起源[J]. 科学通报, 1995, 40(16): 1 480-1 482.
Ouyang Ziyuan, Zhang Fuqin, Lin Wenzhu, Wang Shijie, Ouyang Xinling. Early geochemical heterogeneity (EGCH) of lead isotopic compositions and its origin[J]. Chinese Sci Bull, 1995, 40(21): 1 808-1 812.
- [38] 欧阳自远, 张福勤. 地球的化学不均一性及其起源和演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1995 (2): 88-91.
Ouyang Zi-yuan, Zhang Fu-qin. Chemical heterogeneity of the Earth and its origin and evolution[J]. Bull Mineral Petrol Geochem, 1995 (2): 88-91 (in Chinese).
- [39] 欧阳自远, 刘建忠, 张福勤, 王世杰, 徐琳. 行星地球不均一成因而和演化的理论框架初探[J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 23-30.
Ouyang Zi-yuan, Liu Jian-zhong, Zhang Fu-qin, Wang Shi-jie, Xu Lin. A preliminary study on the origin and evolution on the planetary Earth's heterogeneity[J]. Earth Sci Front, 2002, 9(3): 23-30 (in Chinese with English abstract).
- [40] Liu Jianzhong, Ouyang Ziyuan, Zhang Fuqin, Wang Shijie. Evidence of Nd isotope for unhomogeneity and origin of upper mantle of North China platform [J]. Chinese Sci Bull, 1999, 44(6): 556-560.
- [41] Liu Jianzhong, Zhang Fuqin, Li Chunlai, Wang Shijie. Oxygen isotopic ¹⁷O-¹⁸O heterogeneity in Archaean continental nucleus, North China Craton[J]. Chinese Sci Bull, 1999, 44(24): 2 267-2 269.
- [42] 刘建忠, 欧阳自远. 区域地球化学不均一性起因初探——以吕梁-中条古元古代裂谷带为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 1-7.
Liu Jian-zhong, Ouyang Zi-yuan. A preliminary discussion about origin of geochemical heterogeneity: An example from Luliang-Zhongtiao Paleoproterozoic rift [J]. Bull Mineral Petrol Geochem, 2003, 22(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [43] Moss B E. A model for estimating basin source contributions to impact-derived lunar regolith (Part II) [D]. Washington D C: Washington University in St. Louis, 1994.