

月球磁场与月球演化

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

(1. 中国科学院地球化学研究所, 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 100039)

摘要 月球的磁场强度一般在 $1 \sim 10 \text{ nT}$ ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$) 的范围内, 最大磁场强度超过 100 nT , 强磁场区一般位于大的撞击盆地的对峙区域. 月球样品的剩磁强度与铁的丰度呈负相关, 在 $3.8 \sim 3.6$ 亿年间形成的岩石样品剩磁强度最大. 月球磁场的变化特征与月球的形成与演化有重要的关系, 大碰撞学说解释月球磁场的变化较合理.

关键词 月球磁场, 月球演化, 剩磁, 对峙区

中图分类号 P318

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2005)04-1003-06

Lunar magnetism and its evolution

LI Yong quan^{1,3}, LIU Jian zhong², OUYANG Zi yuan^{1,2}, ZHENG Yong chun², LI Chun lai^{1,3}

(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 100039, China)

Abstract Several satellites observations demonstrate that the general intensity of lunar magnetism is $1 \sim 10 \text{ nT}$ ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$), the largest concentration of strong fields over 100 nT and strong crustal magnetism fields are located in the antipodal region of large impact basins. Remanence intensity of lunar samples are negative related to the abundance of iron, materials which were formed between $3.6 \sim 3.8 \text{ Ga}$ can gain strong remanent magnetism. The variation of lunar magnetism correlates critical relation of the evolution of moon, giant impact hypothesis is reasonable to explain the variation of lunar magnetism.

Keywords lunar magnetism, lunar evolution, remanent magnetism, antipodal region

0 引言

随着我国月球探测工程的立项启动, 有关月球基础科学的研究也逐渐成为学者关注的热点, 因为月球物理特征和内部结构的研究不仅是月球科学的重要组成部分, 而且与月球探测器飞行的轨道控制、着陆器的防护等工程实施方案有密切的联系, 因此对月球磁场的研究不仅有理论意义, 而且有较强的应用价值.

1 现代月球表面的磁场分布特征

现代月球没有全球性的偶极磁场^[1,2]. 阿波罗-15, 16 子卫星^[3]、Luna 10^[4]和 Explorer 35^[5]、Lunar Prospector^[2] (简称 "LP") 环月飞行探测得到的资料显示, 月球磁场强度较低, 一般为几 nT, 且不同

地区磁场强度大小也明显的不同. 月球正面的磁场强度一般为 $0.75 \sim 6.0 \text{ nT}$ ^[3,6], 月表磁场较强的(场强大于 100 nT)区域一般位于月球背面的高地, 正好位于月球正面雨海、东海、澄海、危海等撞击盆地的对峙区域^[2,7]. 在 Descartes 山 ($16^\circ \text{ E}, 12^\circ \text{ S}$) 附近也有类似的强磁场异常区^[8]. 而月表弱磁场一般分布于年轻的撞击坑或撞击盆地^[9], 在雨海纪形成的盆地中发现了月表平均磁场最弱仅为 0.5 nT , 由于撞击退磁作用, 一些哥白尼纪、爱拉托逊纪以及雨海纪形成的盆地平均磁场约为 2.7 nT . 研究还发现, 撞击坑内磁场强度一般比其周围的磁场强度低^[10], 这与最近在火星和地球上一些撞击坑的磁性研究结果相一致^[11-13]. 图 1 为月球正面部分区域的磁场强度分布图^[8], 等高线由电子反射系数值绘制, 其中, 黑色为 0.55 , 蓝色为 0.65 , 红色为 0.75 , 相应的磁场

收稿日期 2005 02 10; 修回日期 2005 04 20.

作者简介 李泳泉, 男, 1982 年生, 湖北黄冈人, 中国科学院地球化学研究所 2005 级博士研究生, 主要从事地球化学及月球科学等方面的研究. (E-mail: liyongquan@bao.ac.cn)

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

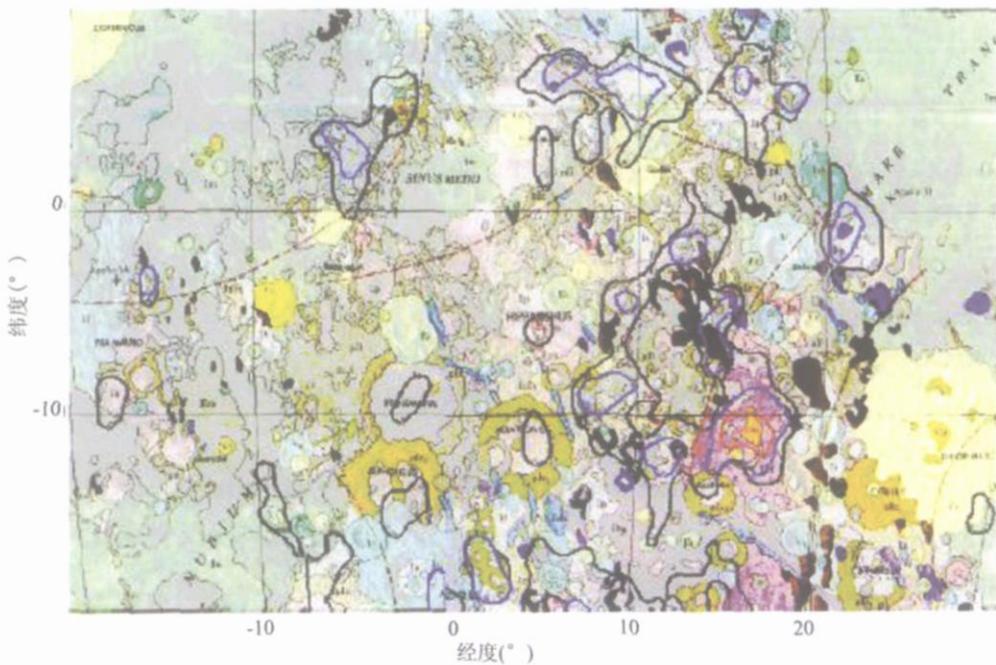


图 1 月球正面部分区域磁场强度分布图

(Halekas et al., 2001)

Fig. 1 A portion of the magnetic intensity map of the near side of the moon

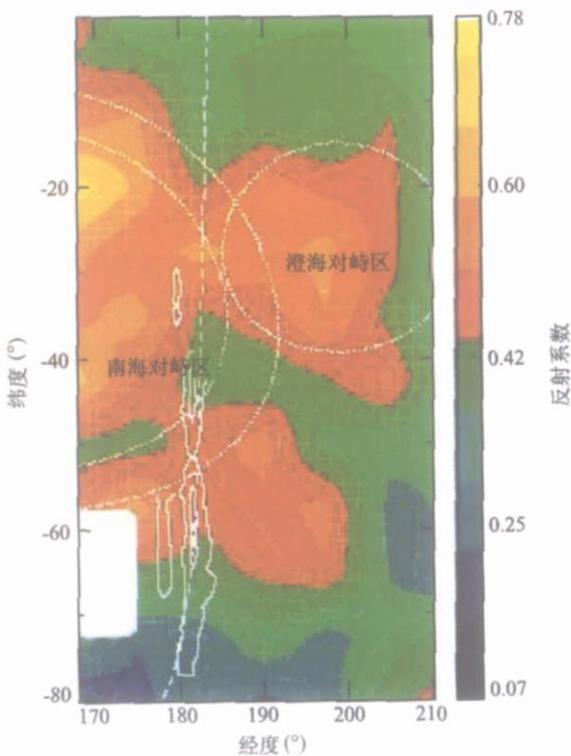


图 2 月球背面部分地区的电子反射强度分布图(Lin et al., 1998)

Fig. 2 A portion of electrons reflection intensity map of the far side of the moon

强度约分别为 7 nT、11 nT、20 nT.

图 2 为由 LP 用电子反射测磁法测得的 220 eV 电子反射系数反映的月壳磁场强度分布图^[2]. 其观测得到的月壳的磁场强度大部分为 1~5 nT, 最高的反射系数(0.78)对应的磁场强度约为 10nT. 该电子反射分布图覆盖月球背面的部分区域, 包括了雨海和澄海等撞击盆地的对峙区域, 其中图像左侧两条同心虚线圆弧包围的区域位于雨海对峙区, 内弧直径约 1 200 km, 外弧直径约 1 500 km; 右侧的虚线圆弧包围的区域位于澄海对峙区, 直径约 740km. 阿波罗-15, 16 子卫星在近赤道轨道上飞行, 通过电子反射测磁法得到比较强的磁场也位于雨海和澄海对峙区. LP 探测结果显示, 强磁场位于雨海对峙区内, 向北偏移 ~5°或向西偏移几度. 在雨海对峙区内, 磁场强度也有变化, 例如: 测得最大的磁场强度位于, ~20°S, 170°E; ~43°S, 170°E; ~36°S, 175°E. 较强的磁场同样分布在除 ~205°E 以东的澄海对峙区域. 在南部高纬度地区发现两个磁场强度相对较弱的地区, 中心位于 ~58°S, 175°E 和 ~55°S, 188°E, 大致位于 Frigoris 海的对峙区.

月表磁场对峙区增强理论认为: 月表的磁化与撞击成盆作用有关. 当高速(> 10 km/s)的撞击形成大盆地时, 产生的等离子云, 在 5 分钟内扩散到整

个月表, 使撞击盆地的对峙区磁场增强. 增强的磁场在等离子云消失之前保留约 1 d 时间, 这要远短于岩石的冷却时间, 因而不能形成热剩磁. 然而由撞击形成的剩磁大小与冲击波在对峙区的能量和撞击形成的喷射物质有关. 撞击形成的喷射物质需要几十分钟到达撞击盆地的对峙区, 模型计算其冲击强度最大可超过 $10 \text{ GPa}^{[15]}$, 使对峙区内的物质足够获得撞击剩磁. 年轻的撞击盆地对峙区周围的场强在 $38.5 \sim 36$ 亿年之间也有增强, 这与返回的月球样品古地磁的研究结果一致, 表明在此期间, 月表有稳定的磁场, 强度约为 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ T}$, 这么强的磁场不可能由太阳磁场或地球磁场形成, 只可能为月球本身形成的磁场.

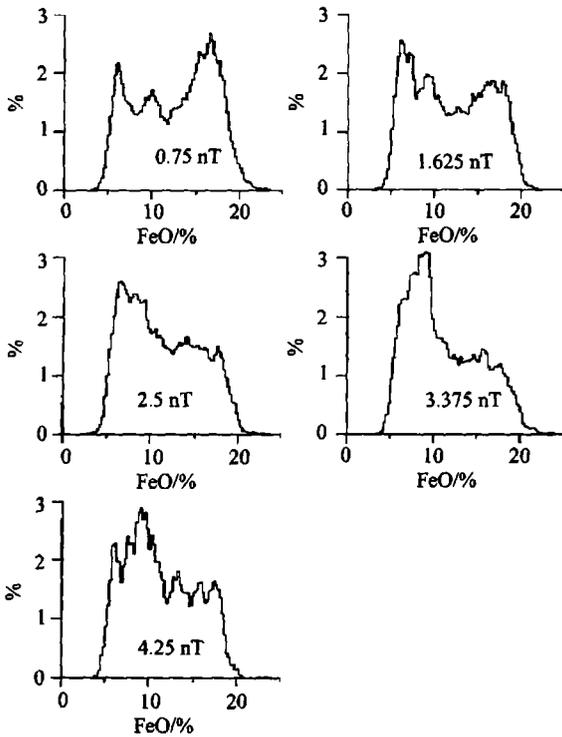


图3 FeO 的含量与剩磁强度的关系图

(Shkuratov et al., 1999)

Fig. 3 A correlation between Fe abundance and remanent magnetism

2 月球样品的剩磁特征

类似于地球岩石的剩磁特征^[16, 17], Apollo 月球样品中玄武岩和角砾岩中都有稳定的天然剩磁^[19] (Natural Remanent Magnetization), Nagata 等 (1972)^[19] 认为月岩中的剩磁与地球岩石中剩磁赋存矿物明显不同, 前者与 Fe 和 Fe Ni 自然金属矿物

有关, 后者主要与磁铁矿以及其它铁氧化物和铁硫化物有关.

月海玄武岩的剩磁大小与其铁的含量有着相当的一致性, 而对剩磁较强的样品研究表明月岩的磁性特征与岩石的结晶颗粒大小有关. Fuller 等 (1987)^[20] 对主要的月海玄武岩的剩磁测量表明, 粒度较细的玄武岩测得的剩磁大.

Nagata 等 (1970)^[21] 对月壤的剩磁特征研究表明, 月壤中的铁有超顺磁 (superparamagnetism) 特征. 月球角砾岩的剩磁与结晶岩类似, Nagata 等 (1972)^[19] 对 14301, 65, 14303, 35 以及 14311, 45 等角砾岩剩磁研究, 发现了角砾岩剩磁强度与 Fe Ni 有关.

2.1 剩磁与元素丰度(Fe)的关系

研究月球样品的剩磁与某些化学元素之间的关系, 对于了解月球内部构造及其演化具有重要的意义. Metzger 等 (1977)^[22] 认为月球岩石剩磁与铁含量有弱的相关性. 下图为铁元素的丰度与不同剩磁强度统计分布的关系图^⑥. 总的来讲, FeO 与剩磁的强度成负相关的关系.

2.2 磁场强度与年代的关系

Fuller (1998)^[18] 画出了 40 亿年以来形成的月球样品测得的剩磁强度和年代投点分布图. 可以看出, 月球磁场强度总体上呈现一个先增后减的趋势, 其中在 38 亿年左右达到最大.

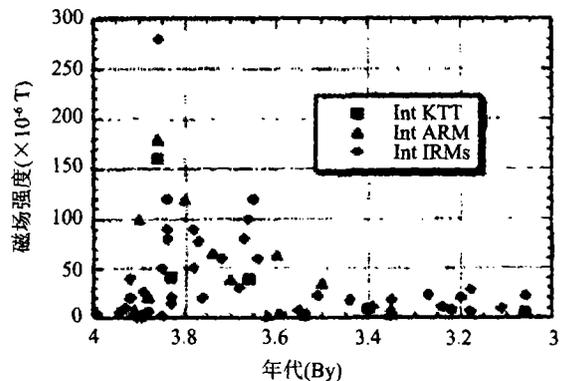


图4 月球样品剩磁与年代变化图

(Fuller, M., 1998)

Fig. 4 A correlation between remanent magnetism and age of lunar sample

注: Int KTT, Int ARM, Int IRMs 分别为 KTT 法 (Koenigsberger Thellier Thellier) 测得月球样品的天然剩磁、非滞剩磁 (Anhyseretic Remanent Magnetization)、饱和等温剩磁 (saturation Isothermal Remanent Magnetization) 的磁场强度.

3 月球磁场变化与其演化的关系

关于地磁场的形成,目前人们普遍认为,地球全球性磁场与地球内液态地核有重要关系.带电流体在地球内部流动,根据发电机原理(dynamo)^[23-25],可以形成全球性的磁场,强度约为 $50\ 000\ \text{nT}$ ^[1]. Apollo 计划中,检测到非常弱的磁场^[6],LP 携带的磁力计和电子反射谱仪^[2,7](空间分辨率约 5 km,磁场强度测量精度为 2 nT)探测得到月表的磁场强度一般为 5~20 nT,最强大于 100 nT.可见现代月球没有液态核,因而不能形成全球性的磁场.但对月球样品剩磁的研究发现,31 亿年前形成的月球岩石具有较明显的剩磁,表明当时月球有一个强的偶极磁场,31 亿年后形成的岩石,几乎没有磁场,表明月球全球性的磁场基本消失.

关于月球磁场的形成与消失,在科学界存在许多争论.有学者^[26-28]认为在 39~36 亿年间,月球上存在很强的磁场.主要是由于那时的月球有一个熔融的月核^[29-31],带电流体在月球内部的流动,类似于现代地球液态外核的“发电机原理”,使月球具有一个全球性的偶极磁场.随着月核的冷却,全球性的磁场强度降低,到 31 亿年左右,月核全部冷却,月球全球性的偶极磁场消失.

基于现代月球没有全球性磁场,而在月球演化的历史时期形成的岩石存在明显的剩磁这一事实,因而可以推测月球演化早期存在较强的磁场,由于后期的月质演化,月球磁场消失.可以肯定,月球的起源和演化与其磁场的变化有着紧密的联系.

关于月球的起源主要有 5 种假说,旋转分裂说(Rotational fission)^[32,33]:月球是由地球高速旋转分裂的一些物质,积聚形成.小撞击喷射说(Small impact collisional ejection)^[34,35]:月球是由小的地外星体连续的撞击地球导致地球物质喷射到地外,逐渐聚集形成.捕获说(Capture hypothesis)^[36]:原来绕太阳运动的月球大小的天体,由于地球引力作用,将其捕获到地球轨道上,形成了现在的月球.“双星”说(“double planet” hypothesis)^[37]:月球是由环绕地球运动许多小的物质和绕太阳运动的物质由于地球引力而捕获,通过不断的积聚而形成.大碰撞形成说(giant impact hypothesis)^[38-42]:月球是由类似于火星大小的星体撞击地球,部分地幔物质与星体物质混合熔融形成.

旋转分裂说认为月球是地球的一部分,由于原始地球的高速旋转,分裂出来的物质在后期的演化

中形成月球.因此,二者在本质上相似,但现代月球和地球磁场分布和强度明显的不同,因此旋转分裂说很难解释二者磁场特征的差异性.“捕获”说和“双星”说认为月球物质是来源于地外空间,由于地球的吸引力的作用,形成月球,但最新的研究成果表明,现代太阳系的许多行星(火星、木星、土星)和卫星表面均有较强的磁场^[43-45],可见此两种假说也难于解释月球磁场的演化特征.小撞击喷射说和大碰撞形成说都认为月球是由地外天体撞击原始地球,撞击抛射出的地幔物质和部分地外物质混合,演化成月球,小撞击喷射说很难解释早期月球有全球性的磁场.基于以上的讨论,根据大碰撞形成说,月球磁场的演化分为以下几个阶段:

(1) 46~40 亿年,由于大的碰撞形成熔融月球,整个月球大部分由硅酸盐岩组成,此时的月球没有磁场.

(2) 40~38 亿年,随着月球的分异和冷却,月表的硅酸盐岩冷却形成固体月亮,而由于核幔边界中富含 U、Th 等放射性元素衰变,释放出的能量使月核加热,仍处于液态,随着分异程度的增加,至 38 亿年达到最大,此时月球有最大的全球性磁场.

(3) 38~31 亿年,由于分异作用结束,随着温度的进一步降低,金属相的月核逐渐冷却,因而全球性的磁场逐渐减弱,至 31 亿年完全消失.

(4) 31 亿年以来,由于没有液态的月核,月球没有全球性的磁场.

4 结 论

月球虽然没有类似于地球全球性的偶极磁场,但在其历史时期(40~31 亿年)有明显的全球性的磁场.多次环月飞行(Apollo, LP)得到的资料显示,在一些大的撞击盆地的对峙区有明显的磁异常区,场强最大可超过 100nT.对于月球磁场的变化特征用大碰撞理论来解释比较合理,因而提供了一个新的证据来支持月球是由类似火星大小的天体撞击地球分裂形成这一假说.

参 考 文 献 (References):

- [1] 中国科学院地球化学研究所[M]. 月质学研究进展. 北京: 科学出版社, 1977, 1~2, 143~146.
- [2] Lin R P, Mitchell DL, Curtis D W, *et al.* Lunar Surface Magnetic Fields and Their Interaction with the Solar Wind; Results from Lunar Prospector[J]. Science, 1998, 281: 1480~1484.
- [3] Russell C T, Coleman P J, Schubert G Jr. Lunar magnetic field: permanent and induced dipole moments[J]. Science,

- 1974, 186: 825 ~ 826.
- [4] Dolginov S H, Eroshenka E G, Zhuzgov L N, *et al.* Measurements of magnetic field in the vicinity of the moon by the artificial satellite Luna 10[J]. *Dokl Akad Nauk SSSR*, 1966, 179: 574 ~ 577.
- [5] Sonnett C P, Colburn D S, Currie R G, *et al.* The geomagnetic tail topology and reconnection and interaction with the moon, in *Physics of the Magnetosphere*[J], edited by Carovillano, R L, McClay J F, Radoski H F, 1967, 416 ~ 484.
- [6] Shkuratov Y G, Kaydash V G, Opanasenko N V. Iron and titanium abundance and maturity degree distribution on the lunar nearside[J]. *Icarus*, 1999, 137: 222 ~ 234.
- [7] Halekas J S, Mitchell D L, Lin R P, *et al.* Lunar crustal magnetism with geology[M]. *Proc of the 32nd planetary Sci Conf*, Institute of Lunar and planetary Sciences, Houston, 2001.
- [8] Richmond N C, Hood L L, Halekas J S, *et al.* Correlation of a strong lunar magnetic anomaly with a high albedo region of the Descartes mountains[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(7): 1395 ~ 1398.
- [9] Halekas J S, Mitchell D L, Lin R P, *et al.* Magnetic properties of lunar geologic terranes: new statistical results[J]. *Proc. of the 32nd planetary Sci. Conf.*, Institute of Lunar and planetary Sciences, Houston, 2002.
- [10] Halekas J S, Mitchell D L, Lin R P, *et al.* Demagnetization signature of lunar impact craters. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(13): 1645 ~ 1648.
- [11] Nimmo F, Gilmore M S. Constraints on the depth of magnetized crust on Mars from impact craters[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106: 12 315 ~ 12 323.
- [12] Pilkington M, Grieve R A F. The geophysical signatures of terrestrial impact craters[J]. *Rev Geophys*, 1992, 30: 161 ~ 181.
- [13] Scott R G, Pilkington M, Tanczyk E I. Magnetic investigations of the West Hawk, Deep Bay, and Clearwater impact structures[J]. *Canada Meteorit Plan Sci*, 1997, 32: 293 ~ 308.
- [14] Wilhelms D E, McCauley J F. Geologic map of the near side of the moon. *U S Geol Survey*, 1977, 1 ~ 703.
- [15] Hood L, Vickery A. Magnetic field amplification and generation in hypervelocity meteoroid impacts with application to lunar paleomagnetism[J]. *Proc Lunar Planet Sci Conf 15th*, Part 1, *J Geophys Res*, 1984, 89: C211 ~ C223.
- [16] 田莉丽, 邓成龙. 岩石的磁学性质[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 109 ~ 117.
- [17] 任收麦, 石采东. 地球磁场相当强度研究现状与展望[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(4): 620 ~ 625.
- [18] Fuller M. Lunar magnetism—a retrospective view of the apollo sample magnetic studies[J]. *Phys Chem Earth*, 1998, 23(7, 8): 725 ~ 735.
- [19] Nagata T, Fisher R M, Schwerer F C. Lunar rock magnetism[J]. *The Moon*, 1972, 4: 170 ~ 196.
- [20] Fuller M, Cisowski S M. Lunar Paleomagnetism[J]. In *Geomagnetism Vol II*, J A Jacobs Ed, 1987, 307 ~ 455.
- [21] Nagata T, Carleton B J. Natural remanent magnetization and viscous magnetization of apollo 11 lunar materials[J]. *J Geomg Goelectr*, 1970, 22: 491 ~ 506.
- [22] Metzger A E, Lin R P, Russel C T. On a correlation between surface remanent magnetism and chemistry for the lunar frontside and limbs[A]. *Proc. Lunar Planet Sci Conf 8th*[C]. 1977, 1187 ~ 1190.
- [23] Whaler K. Does the whole of the Earth's core convect[J]? *Nature*, 1980, 287: 528 ~ 529.
- [24] Zhang K, Gubbins D. On convection in the Earth's core forced by lateral temperature variations in the lower mantle[J]. *Geophys J Intern*, 1992, 108: 247 ~ 255.
- [25] Bullard E C, Gubbins D. Generation of magnetic fields by fluid motions of global scale[J]. *Geophys Astrophys Fluid Dynam*, 1977, 8: 43 ~ 56.
- [26] Cisowski S M, Collinson D W, Runco S K, *et al.* A review of lunar paleointensity data and implications for the origin of lunar magnetism[J]. *Proc 4th Lunar and Planetary Sci. Conf*, Part 2, *J Geophys Res*, 1983, 88(Suppl A): 691 ~ 704.
- [27] Collinson D W. On the existence of magnetic fields on the Moon between 3.6Ga ago and the present. *Phys[J]. Earth Planet Int*, 1984, 34: 102 ~ 116.
- [28] Runcorn S K. The early magnetic field and primeval satellite system of the moon, clues to planetary formation[J]. *Phil Trans Roy Soc Lond A*, 1994, 349: 181 ~ 196.
- [29] Righter K. Does the moon have a metallic core? Constraint from giant impact modeling and siderophile elements[J]. *Icarus*, 2002, 158: 1 ~ 13.
- [30] Rubie D C, Melosh H J, Reid J, *et al.* Constraints on core formation mechanisms from metal silicate equilibration kinetics[J]. *EOS*, 2001, 82, F29.
- [31] Runcorn S K. The formation of the lunar core[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 1205 ~ 1208.
- [32] Ringwood A E. Origin of the Moon: the precipitation hypothesis[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1970, 8: 131 ~ 140.
- [33] Ringwood A E. Flaws in the giant impact hypothesis of lunar origin[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 95: 208 ~ 214.
- [34] Binder A B, Lange M A. On the thermal history of a moon of fission origin. *The Moon*, 1980, 17: 29 ~ 45.
- [35] Binder A B, Oberst J. High stress shallow moonquakes: Evidence for an initially totally molten moon[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1985, 74: 149 ~ 154.
- [36] Wood J A. Moon over mauna loa: a review of hypotheses of formation of Earth's Moon[J]. *Lunar Planet Institute*, In *Origin of the Moon*, 1986: 17 ~ 55.
- [37] Weidenschilling S J, Greenberg R, Chapman C R, *et al.* Origin of the Moon from a circumterrestrial disk[J]. *Lunar Planet Institute*, In *Origin of the Moon*, 1986: 731 ~ 762.
- [38] Newsom H E, Taylor S R. Geochemical implications of the formation of the Moon by a single giant impact[J]. *Nature*, 1989, 338: 29 ~ 34.

- [39] Hartmann W K. Moon's origin: The impact trigger hypothesis [J]. Lunar Planet Institute. In Origin of the Moon, 1986: 579~608.
- [40] Cameron A G W. The impact theory for origin of the Moon [J]. Lunar Planet Institute. In Origin of the Moon, 1986: 609~616.
- [41] Cameron A G W. The origin of the Moon and the single impact hypothesis [J]. V Icarus 1997, 126: 126~137.
- [42] Benz W, Slattery W L, Cameron A G W. The origin of the Moon and the single impact hypothesis. II [J]. Icarus, 1987, 71: 30~45.
- [43] Schubert G, Chan K H, Liao X H, *et al.* Planetary dynamos: Effects of electrically conducting flows overlying turbulent regions of magnetic field generation [J]. Icarus, 2004, 172: 305~315.
- [44] Edward R D S, Fuller M. A possible source for the Martian crustal magnetic field [J]. Earth Planet Sci Lett, 2004, 220: 83~90.
- [45] Stevenson D J. Planetary magnetic fields [J]. Earth Planet Sci Lett, 2003, 208: 1~11.

欢迎订阅
季刊

《地球物理学进展》
2006年每期定价35元

ISSN 1004 2903
CN 11 2982 P
全年140元

《地球物理学进展》1986年创刊,由中国地球物理学会和中国科学院地质与地球物理研究所共同主办,是地球物理及相关学科的综合性学术期刊。国内外公开发行。《地球物理学进展》是中国科技核心期刊,为《中文核心期刊要目总览》2004版、《中国科技论文与引文数据库(CSTPC)》、《中国科学引文数据库核心库》等收录。本刊主要报道地球物理学及相关学科领域的最新研究成果和学科发展动态,探讨我国地球物理学学科的发展战略和发展趋势,主要刊载国内外未公开发表的有创新性或意义重大的研究论文和综述文章。为国民经济建设和学科发展服务。本刊面向国内外各种行业特别是能源、矿产、地质、工程、交通、军事从事地球物理及相关领域工作的科研、生产、管理等方面人士和高等院校广大师生。

订购办法主要有两种:

(1) 向天津全国非邮发报刊联合征订服务部订阅

地 址: 天津市大寺泉集北里别墅17号; 邮 编: 300385
电 话: 022-23973378, 23962479; 传 真: 022-23973378
E-mail: <http://www.LHZD.com>; E-mail: LHZD@public.tpt.tj.cn
户 名: 天津市河西区联合征订服务部
开 户 行: 工商银行天津市尖山分理处
银行帐号: 0302060509104619603

(2) 直接向本刊编辑部订阅(邮局汇款和单位电汇两种方式)

邮局汇款地址: 北京市9825信箱《地球物理学进展》编辑部
电 话: 010-62007700; 010-62007909; 010-62007696
联 系 人: 刘少华, 肖台琴, 徐雅玲, 汪海英
E-mail: shliu@mail.igcas.ac.cn; xtq@mail.igcas.ac.cn; xy1@mail.igcas.ac.cn;
wanghy@mail.igcas.ac.cn; prog@mail.igcas.ac.cn;