

地球磁极倒转的星地碰撞成因

刘广润¹, 张宏泰²

1. 华中科技大学水电学院, 湖北武汉 430074

2. 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430030

摘要: 地球磁场多次发生南北(正负)磁极位置的变换,即极性倒转,这已为大家所公认;但造成这种极性倒转的原因,则是迄今未能很好解答的一个难题。基于地球磁场的发电机效应理论和星地碰撞的动力效应研究,探讨了外星撞击地球造成地球磁场极性倒转的可能性。研究表明,当外星沿与地球自转的正逆不同方向撞击地球时引起的地球转速快慢变化,可导致地球内部核、幔圈层之间的转速相对快慢关系(相对运动方向)发生改变,从而受其控制的液核涡旋方向及相应的地磁场方向也会随之改变,于是就形成地磁极性倒转。这是一个新的思路,它给地磁极性倒转提出了一个简明的动力机制解释。

关键词: 地球磁极倒转;成因;星地碰撞。

中图分类号: P318

文章编号: 1000-2383(2005)03-0371-06

收稿日期: 2004-11-23

Cause of Geomagnetic Polarity Reversal: A View of Collision Dynamics of a Celestial Body with Earth

LIU Guang-run¹, ZHANG Hong-tai²

1. Hydroelectric Department, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan 430030, China

Abstract: It is generally acknowledged that geomagnetic polarity has reversed many times in geological history. However, the cause has been unknown up to now. Based on the theory of a generator effect for the formation of the Earth's magnetic field, and the dynamic effect of a collision with a celestial body, the possibility of a geomagnetic polarity reversal caused by the collision of an asteroid with the Earth is considered in this paper. When a celestial body collides with the Earth in a direction positive or negative to the rotation of the Earth, the rotation speed of the Earth could be quickened or slowed. This could change the direction of the relative movement between Earth's core and mantle. Consequently, the direction of the vortex movement in the liquid core and the geomagnetic field may change, therefore realizing geomagnetic polarity reversal. This new concept gives a simple and clear explanation for the dynamic cause of geomagnetic polarity reversal.

Key words: geomagnetic polarity reversal; cause of formation; collision of a celestial body with the Earth.

1 地球磁场极性倒转概况

古地磁的研究发现,在漫长的地质历史时期中,地球磁场的正负极性不断地发生 180° 的来回倒转,并且是全球同步的。这一现象的发现是20世纪古地磁学的重大成果。在地质学中,它不仅可以通过岩石原位剩磁性的研究及与岩石年龄测定对比,建立起地磁极性倒转——地质年代对应关系,有助于对

地层进行更为可靠的年代划分与对比,而且可以据之进一步深入研究地磁场的起因和变化,以及地球的内部结构与自身运动的特点,因而引起国内外学者的极大关注。C. S. 考克斯于1969年提出了近4.5 Ma的地磁极性年表,并被普遍应用,其简化形式如图1(金旭和傅维洲,2003)所示。其后,随着测试技术精度的不断提高,极性界线年龄数值也不断被修订,据Mankinen and Dalrymple (1979)、Hilgen (1991)、

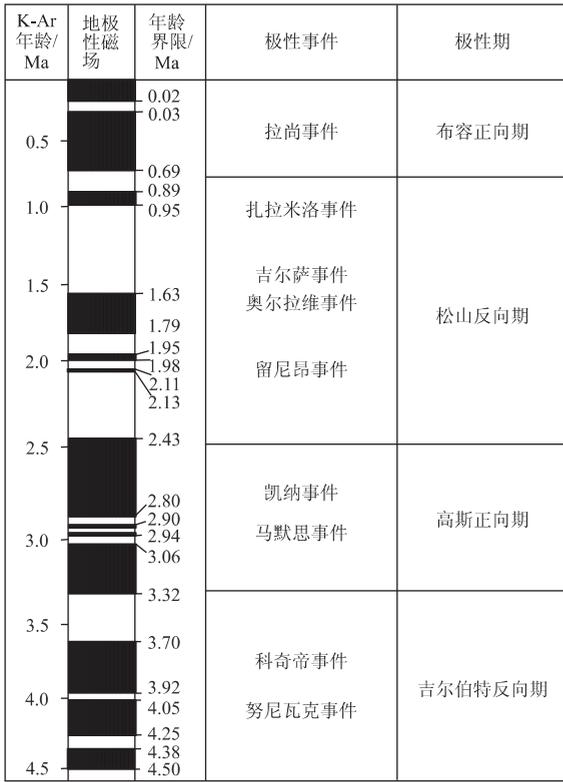


图 1 近 4.5 Ma 地磁极性年表

Fig. 1 Geomagnetic polarity reversal time scale during 4.5 Ma

Cande and Kent (1992)、Hall and Farrell (1995) 等所提出的修订成果, 多数认为布容期与松山期的界线年龄应修正为 0.78 Ma, 高斯期的结束年龄在 2.50~2.62 Ma, 拉尚事件不再被承认, 认为那只是一次极偏移. 但地磁极性期及主要极性事件划分的基本格局无大变化.

从图 1 可以看出, 地球磁极倒转有不太规则的长短周期性, 长周期约 1 Ma, 短周期 0.2~0.3 Ma, 中间还有小的反复. 近期研究还发现, 极性倒转不是瞬时骤然完成, 而是经过一定时间的过渡, 在过渡期中, 两极差异(整个磁场强度)逐渐减弱, 直至消失再转为反性状态增强.

2 地球磁场及磁极倒转成因的研究

地球磁场成因的研究, 从 20 世纪初开始至今已有近百年的历史. 但在 20 世纪 50 年代中期以前, 没有一种假说能令人满意地解释地球的永磁性, 比较公认的是, 地磁场的形成与地球的自转活动有关, 而单凭地球自转不能形成地球磁场. 20 世纪 50 年代

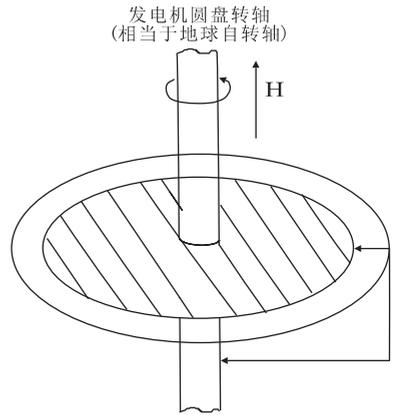


图 2 地磁场的发电机成因模式

Fig. 2 Generator model for geomagnetic field

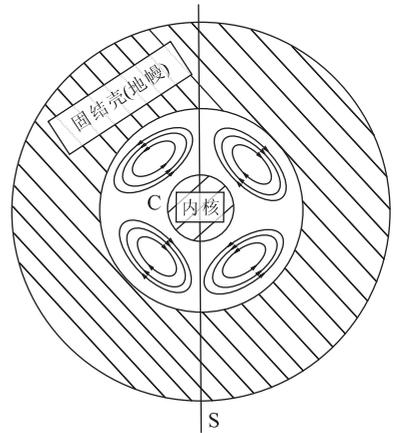


图 3 地核中涡旋的排列

Fig. 3 Arrangement of vortices in Earth core

以来的深入研究, 倾向于认为地球液核中的涡旋运动是地磁场的来源, 基本上围绕着 J. 弗兰克提出的发电机效应理论而展开. 该理论认为地核中的金属物质在磁场中作涡旋运动时, 通过感应方式而产生电流, 这种电流自身所形成的场就是连续不断的再生磁场, 好像发电机中的情况一样, 并由法拉第概括成简化的发电机效应模型(图 2)(扬诺夫斯基, 1982). 进而, E. 布拉德提出一种反映在地磁场形成过程中地球液相外核中的涡旋排列模型(图 3)(扬诺夫斯基, 1982), 它是根据地核由固相内核和液相外核构成的这样一种构造提出来的. 按照这种模型, 地核绕轴旋转的速度比地幔小, 二者转速之差与西向漂移(核对幔)速度相吻合, 而液核部分中的涡旋环便落在子午面内(扬诺夫斯基, 1982). E. 布拉德还研究了关于核幔之间相对转速差值达到多大才能满足地核内产生再生磁场的问题, 经计算认为大约是 0.01 cm/s.

在发现了地磁场磁极可以发生倒转这个现象

后,人们对地磁学的研究便开阔了新的思路,以新的方式来认识地球的结构,并将地磁极倒转作为重点研究的问题.布拉德最先对地球磁极倒转的成因进行了解释研究,他在仔细地分析这种既定条件的单轴发电机效应的机制之后指出,在任何运动条件下,这种模型都不能自发地将其感应磁场的方向改变成相反的方向.但这不能排除改变其内部结构及边界条件后不会发生类似现象.S.朗科恩从理论上探讨了磁极倒转这个问题(扬诺夫斯基,1982).他以E.布拉德的结论为出发点,在比较普遍的形式下解决了地磁场磁极倒转的理论可能性问题,即在地核中,由核、幔之间相对角速度旋转差异产生内涡流场,根据磁流体动力学方程并不排除地核磁矩方向改变成相反方向的可能性.根据地磁学的磁流体动力学理论,偶极子磁矩是由地核里的电流决定的,因此,为了解决有关地磁极反转可能性的问题,必须把磁矩表示为在地核中流动的电流密度的函数.他计算的地球磁偶极子的磁矩为:

$$M_z = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi\sigma}{(2n+1)c^2} \int_{r_1}^{r_2} r^2 F_n(r) \varphi_n(r) dr. \quad (1)$$

式中, r_1 和 r_2 是外地核的2个界面.由式(1)可以得出, M_z 可能为正号也可能为负号,这取决于函数 $F_n(r)$ 或者 $\varphi_n(r)$ 有什么样的符号.但是,函数 $F_n(r)$ 的形式取决于地核里的涡流运动速度的函数形式,而函数 $\varphi_n(r)$ 的形式则取决于环型磁场的函数形式.因为环型磁场随时间变化是个常数,所以 M_z 的数值和符号的变化只和函数 $F_n(r)$ 有关.可是,关于在什么样的条件下函数 $F_n(r)$ 才改变自己符号的问题,仍然是这一理论中悬而未决的问题.

张少泉(1987)在《地球物理学概论》一书中论述地球磁场成因时提出维持地球偶磁极场在漫长的地质年代里保持稳定的能源问题比机制问题更重要,因为能源问题不解决,机制的学说就不能被普遍接受.关于能源问题,书中提出3种可能,它们可以使液态地核保持充分的转动和涡旋,以维持发电机运转和反运转.这3种能源,一是重力分异和物质相变等因素,使得固态内核不断扩大,相应地,使液态外核不断缩小,在这个过程中,要放出热量,提供能量维持流体运动;二是地核中长寿放射性元素释放的热能,使液核物质受热膨胀,从而产生对流;三是地幔与地核的自转轴向运动速率差异.他认为前2种可能性很难成立,而第3种,即地幔与地核的自转轴向速率差异是最有希望的能量来源.

近些年来,对于产生地球磁场极性倒转原因的研究,大家都把焦点放在地核(液态外核)与地幔圈层之间转速差异变化上.这是不难理解的.因为既然认为地球基本磁场是由核幔之间转速差异的耦合而引起的液核涡旋运动产生的,那么,当这种耦合条件(转速差异状态)改变时,涡旋运动及地磁场状态也会相应改变.但对造成核幔之间转速差异变化的形成机制则众说纷纭.有人推测是由于液核层中上下热对流速度的快慢变化所引起(热对流快时,液核旋转变慢,反之变快),有人则想象可能是由于突然有大量冷物体迅速与液核接触,改变了其中的热流状态(朱日祥等,1999).在一些对地磁极性转换时期地磁场强度变化特征的研究成果中,有人认为地磁极性转换就是地磁场强度周期性变化的结果.

由于地磁极性倒转与古气候变化及地质突变事件有较明显的对应关系,在寻找它们之间的内在联系时,人们自然会联想起星地碰撞与地磁极性倒转的关系.Glass and Heezen (1967)提出过0.7 Ma前陨石撞地球造成地表生物灭绝,并且使地核流体运动状态发生变化,从而引起地磁极性倒转.他们认为其形成机制是巨型陨石撞击地球使大气中产生大量尘埃引起地表气温下降和冰期出现,导致极地冰量增加和海平面下降,造成地球转动惯量和转速变化,从而使地球核幔交界处的剪切力发生改变,进而引起地磁极性倒转频率的变化.这种将陨石撞击引起的气候变化作为导致地磁极性倒转和生物灭绝的共同起因的解释曾引起关注,但未被广泛接受.至于究竟核幔转速差异变化需要达到什么程度才能导致地磁极性倒转的阈值问题则无人论及.

从上述研究成果可以看出或导出以下几点:(1)地磁场的成因在于地球的外核流体的涡旋运动;(2)引起外核流体涡旋运动的动力和维持其不变的能源可能是地幔与地核运动速率的差异;(3)产生地磁场极性倒转的原因,取决于地球外核里涡流运动状态的变化,以及其所受制的核、幔之间的运动速率差异变化,但对在什么条件下发生这种变化的问题,前人说法不一,尚无圆满答案.

笔者认为外星撞击地球引起地磁极性倒转的说法最具有实际可能性,但其形成核幔转速快慢关系变化的机制不需通过撞击引起古气候变化的途径去寻求解释,而可由不同方向的撞击动力直接造成.其变化阈值也可从中加以明确确定.

3 外星撞击地球导致地球磁极倒转的动力机制

E. 布拉德指出地磁场发电机模型(图 3)不能自发地将其感应磁场的方向改变成相反的方向,是基于地核转速小于地幔的固定机制条件而言,不能排除当这种快慢关系发生转变时引起磁场方向改变的可能性。这种可能性同样可在上述的 S. 朗科恩计算地磁偶极子磁矩公式中得到证明,即当核幔旋转快慢关系发生转变时,能够引起外核涡流运动方向的变化,这就意味着其运动速度发生了正负符号变化,从而造成 $F_n(r)$ 的符号和磁矩 M_z 符号的改变,即地球磁极发生倒转。杨学祥等(1998)研究认为,地磁场转向与液核热对流变化引起的核幔之间相对转速快慢关系变化有关。

笔者认为,核、幔之间转速相对快慢关系的变化应该与地球的自转速度变化有关。本文正是基于星地碰撞动力学观点,探讨在什么样的情况下使得地核与地幔之间转动速率差异发生方向性改变,这种改变又如何可以使得地磁极性发生倒转。

引起地球自转速度及核幔之间的相对转速差异的变化原因可能有内、外部多种。前人已经考虑到的内部原因有物质运动引起的沿半径方向上的重力(密度)变化、由温度或化学变化引起的体积变化(收缩或膨胀)等;外部原因有太阳、月亮等星球的引力影响,如潮汐、旋进和章动等。上述内部条件变化,在地球形成初期可能比较强烈,到其形态固定、圈层结构形成之后,逐渐减弱,影响轻微;因此,在研究地球本身旋转速度变化时,学者们都重点考虑天体(太阳、月球及其他行星)对地球运动的影响。太阳、月亮等星球对地球的引力影响,经过 H. 邦德、R. 利特尔顿以及 E. 布拉德等人的精确计算,均不能使幔、核之间的速率差异值达到理论上所预计的 $v=0.01$ cm/s(扬诺夫斯基,1982),而外星(小行星等)撞击地球所引起的地球旋转速率变化是唯一能够达到此种量级的外力。下面以地球遭受半径为 10 km 的小行星碰撞所引起的自转角速度变化为例加以说明。

假设半径为 10 km 的小行星与地球相向飞行并在地球赤道面上与之相切撞击,根据理论力学的碰撞理论(Воронков, 1954),在碰撞冲量的作用下物体角速度发生的变化,等于该碰撞冲量对于转动轴之矩除以该物体对于同轴的转动惯量,并可用式(2)

表达:

$$\omega - \omega_0 = \frac{mom_0(S)}{J_z} \quad (2)$$

式中, mom_0 为地球半径, 6.37×10^6 m; J_z 为地球自转转动惯量, 8.068×10^{37} kg · m²; ω_0 为地球原有自转角速度, 0.729×10^{-4} rad/s; ω 为碰撞后地球自转角速度; S 为 10 km 半径的小行星撞击地球的碰撞冲量,

$$S = \frac{m_1 \times m_2}{m_1 + m_2} (v_1 + v_2),$$

其中: m_1 为地球质量, 5.976×10^{24} kg; m_2 为半径为 10 km 的小行星质量, 2.31×10^{16} kg; v_1 为地球公转速度, 2.979×10^4 m/s; v_2 为小行星运行速度,设定为 5×10^4 m/s。地球在无垠的宇宙中沿公转轨道运行,绕本身地轴自转,由于天体中巨大的约束力,可以把地球的地轴视为地球自转的固定轴。为了计算简便,本次计算按小行星在地球赤道附近对地球进行剪切撞击,并假设为非弹性碰撞,外星体全部进入地球。现将地球与外星的物理参数代入式(2),得 $\omega - \omega_0 = 1.45 \times 10^{-10}$ rad/s。相对于地球原有自转角速度(0.729×10^{-4} rad/s),地球自转角速度相对变化率为 1.99×10^{-6} 。也就是说,当半径为 10 km 的外星与地球赤道相切碰撞时,可引起地球自转角速度发生 1.45×10^{-10} rad/s 的变化,其相对变化率为 1.99×10^{-6} 。

因外星撞击方向与地球自转方向的不同,其所引起的地球自转速率变化可能是正的(加速),也可能是负的(减速),而且,对地球内部各圈层转速的影响也不相同。另据各方面的观测研究成果,地球现时各圈层相对于下地幔的转速均有差异,而差值相差悬殊。岩石圈(及软流层)相对于下地幔的圈层运动速率量级为 cm/a 级,而外地核和内地核相对于下地幔为 km/a 级(扬诺夫斯基,1982),故在讨论外星撞击地球引起各圈层转速变化时,可将地球的内部圈层概分为内核(固态)、外核(液态)和壳幔(固态)三大层加以论述。外星撞击引起的突然速率变化,首先由固态的壳幔圈层承担,并向内部传递,因地球外核为液态,不能同步跟随,在较长时间内因惯性仍维持其原有转速,于是在地球各圈层之间,首先是核幔之间的原有转速快慢关系发生变化,如图 4 所示。

图 4 中, I、II、III 分别代表地球内核(固态)、地球外核(液态)、地球地幔和地壳(固态); ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别代表地球内核、外核和壳幔的旋转角速度。下面

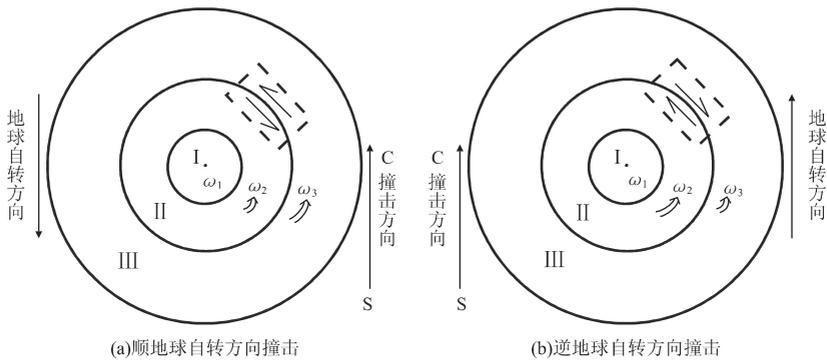


图 4 不同方向的星地碰撞引起地球核幔层圈之间相对运动变化

Fig. 4 Sketch map showing the change of the direction of relative movement between Earth core and Earth mantle induced by the collision of a celestial body with the Earth along different directions

仍按前述星地有关的数据具体分析地球在受小行星撞击前后的地球内部各层圈之间相对运动的变化:

(1) 撞击前. 根据前人研究资料, 地核相对于地幔是以 10^{-2} cm/s 的切线速度在旋转(吴汉珍, 1997), 而且是地核滞后于地幔 ($\omega_2 < \omega_3$), 即地核相对于地幔的旋转方向是与地球自转方向相反, 这个速率差值要维持磁场最低所需大概为 0.01 cm/s. 按现时状态考虑, 在地球自转的情况下, 按地球磁场以 $0.2^\circ/a$ 的西向漂移速率计算, 核幔旋转速率差异为 0.038 cm/s 改变成相反方向的同等差速, 则需要有大于原有速率值 2 倍, 即 0.02 cm/s 的反向增速. 若在现代差值条件下, 欲改变成相反磁场, 则需要有 $0.038 \text{ cm/s} + 0.01 \text{ cm/s}$, 即 0.048 cm/s 的反向增速; (2) 撞击后. 地球在受到半径为 10 km 的小行星在赤道附近的剪切撞击后, 地球会产生 1.45×10^{-10} rad/s 的角速度变化, 这个变化使得地核相对于地幔在核幔边界上发生了切线速度为 0.05 cm/s 的变化(按核幔界面距地心为 3.37×10^6 m 计算). 但是, 因受剪切撞击的方向不同会产生不同的变化.

当小行星顺地球自转方向进行剪切撞击后, 如图 4a 所示, 在核幔界面所产生的 0.05 cm/s 切线速度变化, 与原有的核、幔之间速率差异的方向相同, 使得原有的核幔之间旋转速率差异增大, 外核的转速仍滞后于壳幔, $\omega_2 < \omega_3$ 的性质不变, 地磁场的性质也不会改变. 当外星逆地球自转方向进行剪切撞击时, 如图 4b 所示, 在核幔之间产生 0.05 cm/s 的速率变化, 与原核、幔之间速率差的方向相反, 使得地核相对于地幔的运动速率差发生了方向性改变, 变成 $\omega_2 > \omega_3$, 即地核的旋转速率快于地幔, 且其反

向差值超过最低理论值 0.01 cm/s 及现实所需的 0.048 cm/s. 按照产生地磁场的发电机效应理论, 既然地球磁场是基于核幔之间一定方向的相对旋转速率的差异而形成的, 那么, 当这种速率差异的矢量方向改变时, 感应磁场方向也应改变. 若按 E. 布拉德模型(图 3)分析, 这种矢量方向的改变, 会引起外核中适应原有矢量方向的液态物质涡流转动方向的改变, 即涡流环的方向改变, 从而改变激发磁场的极性方向, 导致地磁场极性倒转, 也就是使前述地磁场的发电机效应模型(图 2)发生了方向倒转.

另外, 由于核、幔之间的物性不同, 外核作为非刚性物体做力的传递时会有滞后性, 因而, 核幔之间运动速率的改变导致外核的涡旋运动方向发生改变要有个过程, 这与前人研究提出的磁场改变方向时间大约为 1 万年、地磁场倒转期间磁场强度有减弱、消失再转为反性的现象是一致的.

关于星地碰撞的机遇问题, 据已有推断资料, 直径 100 m 的外星碰撞地球的概率约 5 000 年 1 次, 直径 1 km 的外星碰撞概率约 10 万年 1 次, 超过 1 km(上限未见明确, 可视为几公里)者概率约 50 万年 1 次. 笔者前述计算表明, 有 10 km 半径的外星碰撞, 即可能改变现状, 造成地磁极性倒转. 考虑到目前地球磁场现状(核幔转速差异程度及磁场强度)并非处于弱磁期, 真正改变其弱磁期状态所需碰撞的外星规模还可能小于此数, 估计直径几公里的外星碰撞即可. 这方面的推断计算都是很粗略的, 与上述有关情况, 如 20~30 万年一遇的磁极颠倒周期等, 可以说是基本吻合. 由此可见, 星地碰撞造成地磁极性倒转的外星机遇条件也是存在的.

总之, 星地碰撞可以为地球磁极倒转提供较为

简明合理的动力机制解释。星地碰撞引起的地球自转速度反复快慢变化,导致地球核幔之间的转速相对快慢关系发生方向性变化,由此造成地球磁场的磁矩矢量方向的改变,从而发生地磁场极性方向的倒转。本文对地磁极性倒转这个地球科学中的重大疑难问题提出了一个新的思路或解开之门,并初步阐明了其合理性,是否符合实际还有待进一步研究。

References

- Cande, S. , Kent, D. V. , 1992. A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. of Geophys. Res.* ,97:13917—13951.
- Glass, B. P. , Heezen, B. C. , 1967. Tektites and geomagnetic reversals. *Sci. Am.* ,217:32—38.
- Hall, C. M. , Farrell, J. W. , 1995. Laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of tephra from Indian Ocean deep-sea sediments: Tie points for the astronomical and geomagnetic polarity time scales. *Earth and Planetary Science Letters* ,133:327—328.
- Hilgen, F. J. , 1991. Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropels in the Mediterranean and implication of the geomagnetic polarity time scale. *Earth and Planetary Science Letters* ,104:226—244.
- Jin, X. , Fu, W. Z. , 2003. Foundation of solid geophysics. Jilin University Press, Changchun (in Chinese).
- Mankinen, E. A. , Dalrymple, G. B. , 1979. Revised geomagnetic polarity time scale for the interval 0—5 m. y. B. P. *J. of Geophys. Res.* ,84:615—626.
- Woronkov, E. M. , 1954. Course of theoretical mechanics. Translated from Russian by Institute of Theoretical Mechanics of Harbin Institute of Technology. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Wu, H. Z. , 1997. Geodynamics of the rotating earth. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, X. X. , Chen, D. Y. , Song, X. H. , et al. , 1998. Discovery of fast rotation of the Earth's inner core and its dynamic significance. *Crustal Deformation and Earthquake* ,18(1):57—63 (in Chinese with English abstract).
- Yanovski, B. M. , 1982. Geomagnetism. Translated by Liu, H. X. , Zhou, X. . Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, S. Q. , 1987. Introduction to geophysics. Seismological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhu, R. X. , Liu, Q. S. , Pan, Y. X. , 1999. The relationship of the geomagnetic polarity reversal with geological events of all world. *Chinese Science Bulletin* ,44(15):1582—1589 (in Chinese).

附中文参考文献

- Воронков, И. М. , 1954. 理论力学教程(下册). 哈尔滨工业大学理论力学研究室译. 北京:高等教育出版社.
- 金旭, 傅维洲, 2003. 固体地球物理学基础. 长春:吉林大学出版社.
- 吴汉珍, 1997. 旋转地球动力学. 北京:地质出版社.
- 扬诺夫斯基, Б. М. , 1982. 地磁学. 刘洪学和周秀译. 北京:地质出版社.
- 杨学祥, 陈殿友, 宋秀环, 等, 1998. 地球内核快速旋转的发现及其动力学意义. *地壳形变与地震* ,18(1):57—63.
- 张少泉, 1987. 地球物理学概论. 北京:地震出版社.
- 朱日祥, 刘青松, 潘永信, 1999. 地磁极性倒转与全球性地质事件的相关性. *科学通报* ,44(15):1582—1589.