

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

中生代地球系统与核—幔边界动力学研究进展

邵济安

韩庆军

(北京大学综合技术研究所, 100871) (中国科学院地质研究所, 北京, 100029)

内容提要 本文介绍了90年代以来地球物理学在地球磁场方面(地球磁场古强度, 地磁场极性反转频率以及真极移)的研究成果, 揭示了200~100 Ma全球低的地球磁场古强度; 124~83 Ma低的极性反转频率以及170~110 Ma近乎停滞的真极移。与此同时, 地球表面发生了一系列由地幔热柱上升而导致的构造热事件。它们的联系引起地球科学工作者的极大兴趣。本文介绍的两模型, 正是从核—幔边界结构演变的角度去探讨地球磁场与热场的关系。最后还从地质学的角度, 提出了面临的挑战及一些值得深入探讨的地球动力学问题。

关键词 地球系统 地球磁场古强度 地磁场极性反转频率 真极移 地幔柱

回顾90年代国际地球科学的进展, 特别是近年提出的“地球系统”(或全球构造)是本世纪继大陆漂移、板块构造学说之后的第三次飞跃^[1], 这次飞跃带来的是一个整体的地球观, 人们的视线从岩石圈扩展到核—幔边界升起的地幔热柱^[2,3], 通过地震层析研究, 进一步认识到, 多圈层、多级别的地幔柱和一定范围内的地幔对流相结合构成地球内部的复杂结构。地球内核与外核之间相对运动的发现^[4]进一步支持了地球多圈层相对运动的观点, 推动了地球动力学的研究。同时, 人们更加认识到地球内部热能的不平衡是维系各圈层运动的重要因素。在地球系统的诸方面研究中, 地球磁场强度的研究尤为引人注目。本文着重介绍地球物理学在这一领域的研究成果。地球磁场强度是随时间而变化的, 它记录了核—幔边界的结构演变信息, 为人们进一步认识地球演化规律提供了新的途径。近年来地球磁场古强度变化与地球动力学(如地球的有限膨胀与收缩)之间的相关性, 引起人们极大兴趣。地球物理学家发现180~100 Ma间全球地磁强度只有新生代的1/3, 并称它为“中生代偶极子场低(MDL)”。在美国国家科学基金会支持召开的第三届 Santa Fe 岩石磁化会议和 Orcas 岛洋壳磁化强度会议上, 人们注意到许多重要的地质—地球化学过程正是发生在这一时期, 如幕式地幔对流(episodic mantle convection), 地幔柱活动, 海底扩张, 全球气温变化, 石油形成以及洋底高原、海山链、大型岩浆省和大陆溢流玄武岩的形成^[5], 还有海底磁异常记录的系统变化和陆块消失等^[6]。地幔热柱起源于核—幔边界, 地球磁场古强度变化又与核—幔边界结构演变有关, 二者关系密切。地球磁场的极性在地质历史时期大约每1 Ma倒转5次^[5], 但洋底研究揭示出从124 Ma到83 Ma地磁场极性停止了反转, 其极性为正向, 即与现今地球磁场极性相同, 称为“CNS”, 即 Cretaceous Normal Superchron, 可译为白垩纪正向超静磁带, 也有人译为白垩纪正向偏极性超时^[7]。然而如前所述, 124~83 Ma期间地球表层正处于极为活跃的热状态中, 那么地球表层的活跃与地球内部的“超静”有什么内在联系? 这已经成为目前古地磁学的热门课题。

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号49672156)的研究成果。

本文1998年3月收到, 4月改回, 萧品芳编辑。

1 中生代偶极子场低(MDL)

1990年Prevot等人^[8]在研究中生代地球磁场古强度变化时,发现自晚白垩世以来,平均偶极子场强度几乎是稳定的,但在中生代的大部分时期内(180~100 Ma),偶极子场强度只是新生代的1/3,表征磁场强度的虚偶极矩(VDM)值较低,只有 $(2.5\sim 4.4)\times 10^{22}\text{ A}\cdot\text{m}^2$ (图1)(现今VDM平均值为 $8\times 10^{22}\text{ A}\cdot\text{m}^2$)。他们将这一现象称为“中生代偶极子场低”(MDL——Mesozoic dipole low)^[8]。这一结果主要来自Bol'shakov等人^[9~12]1978~1987年对高加索地区研究的结果。

Perrin等人对欧洲两个早侏罗世侵位的玄武岩岩墙进行了地球磁场古强度研究^[13],得出其平均的VDM值为 $3.5\times 10^{22}\text{ A}\cdot\text{m}^2$,不仅证实了MDL的存在,而且将其起始时间从180 Ma提前到200 Ma。近年来,Pick和Tauxe^[14]采用东太平洋洋底的玄武玻璃测定了白垩纪(124~83 Ma)地球磁场古强度,其VDM值为 $2\sim 4\times 10^{22}\text{ A}\cdot\text{m}^2$ 。Sherwood等^[15]对以色列和印度火山熔岩的测定和Kosterov等人^[16]对非洲南部莱索托玄武岩的研究都再次

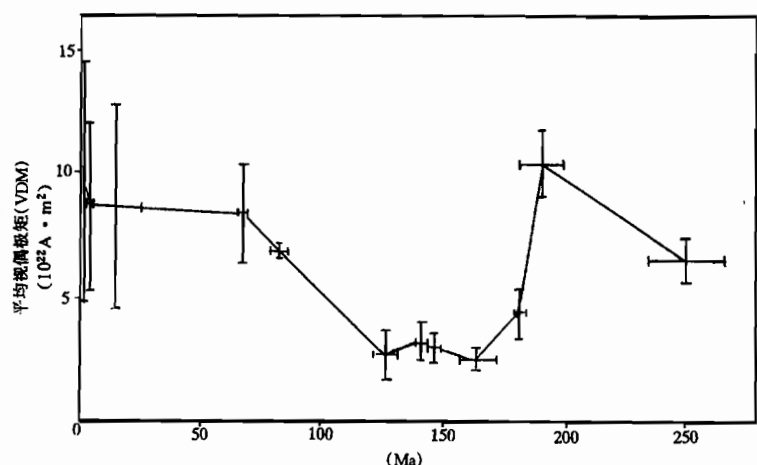


图1 中生代以来的地球磁场古强度(据Prevot等^[8])

Fig. 1 Paleointensity of the geomagnetic field from Mesozoic (after Prevot et al. ^[8])

证实了中生代低地磁场强度的存在。尽管目前以地质时代为函数的地球磁场强度记录还远未完成,但是从已有的资料(表1)可以看出,200~100 Ma期间全球地球磁场强度比现今低。

2 中生代真极移与地球磁场极性反转频率的变化

假定地磁极轴与地球旋转轴重合,可以用古地磁视极移(APW)判断岩石圈板块相对于地球旋转轴的运动。另外,热点轨迹可以用来指示岩石圈板块和地幔之间的相对运动。将视极移结果与热点轨迹作比较,就可以得到真极移(TPW)。真极移可以理解地幔相对于地球旋转轴的运动。

Courtillot和Besse^[17]分析了全球主要克拉通200 Ma以来的真极移,并与同时期的地球磁场极性反转频率作了对比。他们发现在200~170 Ma之间,真极移速率约为5cm/a,之后有60 Ma的停滞,从110

表1 中生代低地球磁场古强度资料汇集

Table 1 Data for Mesozoic lower palaeointensity of geomagnetic field

取样地点	样品名称	样品时代 (Ma)	VDM ($10^{22}\text{ A}\cdot\text{m}^2$)	资料来源
高加索	蛇绿岩	180~100	2.5~4	[9~12]
东太平洋底	玄武质玻璃	124~83	2~4	[14]
法国西北	拉班玄武岩岩墙	205~155	3.2	[13]
葡—西交界	拉班玄武岩岩墙	209~137	3.7	[13]
以色列	玄武岩	95	4.7	[15]
印度	玄武岩	120	5.5	[15]
莱索托	玄武岩	180	4.6	[16]

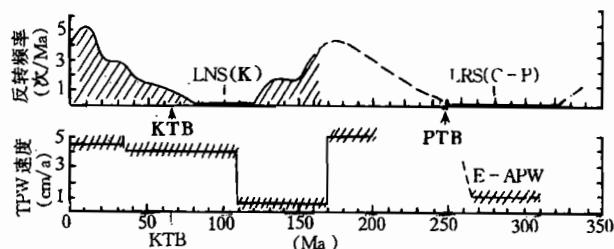


图2 中生代以来地磁场极性反转频率与真极移变化
(据 Courtillot 等^[17])

Fig. 2 Changes in frequency of reversals of the geomagnetic field and the true polar wander (TPW) from Mesozoic to present (after Courtillot et al.^[17])

KTB—白垩纪—第三纪界线; PTB—二叠纪—三叠纪界线; LNS(K)—白垩纪长期正向超静磁带; LRS(C-P)—石炭纪—二叠纪长期反向超静磁带; E-APW—欧亚大陆视极移

KTB—Cretaceous—Tertiary boundary; PTB—Permian—Triassic boundary; LNS(K)—Cretaceous long normal superchron; LRS(C-P)—Cretaceous—Permian long reverse superchron; E-APW—Eurasia apparent polar wander

也应运而生。

3 核—幔边界动力学的理论模型

为了解释中生代磁场变化与地球表层活跃的热演化之间的关系,地球物理学家建立了一些理论模型,这中间最有代表性的两个模型是 Larson 等人^[5]提出的超级地幔柱模型和 Courtillot 等人^[17]提出的核—幔耦合模型。这两个不同模型都建立在同一个事实基础上,即承认地球表面热扩张与起源于核—幔边界的地幔柱活动有关,而地幔柱又与核—幔边界的结构演变有关。由于对引起地球磁场极性反转频率变化原因的认识不同,导致了两个模型的差异。

在介绍这两种模型前,有必要将核—幔边界的结构作一简介。下地幔最下部的热和化学边界层称为 D'' 层,一般认为厚度在 50~500 km 之间,其温度较上覆地幔高,而粘度则较低。D'' 层之下为核—幔交界(CMB),它具有起伏复杂的地势,厚度变化在 10 km 范围内^[17]。

3.1 超级地幔柱模型

Larson 等人^[5]认为 D'' 层内由于局部热失衡导致地幔热柱形成,当其热浮力超过上部地幔的粘滞力时,地幔热柱就会从 D'' 层上升,导致 D'' 层减薄及加快穿过 CMB 热量的散发。地核为了弥补其顶面的热量损失,加快外地核对流强度,当对流强度增加到一定的临界值时,地磁场就停止极性反转,造成超静磁带的发生(图 3)。该模型认为超静磁带发生时, D'' 层极为活跃,地核发电机处于高能状态。据此模型, Larson 等人预言 CNS 发生时,地球磁场强度异常高。

3.2 核—幔耦合模型

Courtillot 等人^[17]认为在 CMB 之上, D'' 层以地幔热柱或热流形式向上覆地幔释放热量,加快了地幔对流及真极移的速率。这些热不稳定物质要么直接穿过地幔,要么促使地幔释放出新

Ma 开始真极移速率再次加快至 4~5 cm/a。而地球磁场极性反转频率在 165~124 Ma 期间由 1 Ma 4 次单调降低至 0 次,之后在 124~83 Ma 长达 41 Ma 时间内没有反转,即所谓的“白垩纪正向超静磁带”(CNS)。83 Ma 以后,地磁场极性反转频率又从 1 Ma 0 次增加到 5 次。165 Ma 以前,石炭纪—二叠纪(320~250 Ma)曾发生了一次长时期的地磁场反向超静磁带(LRS——long reversed superchron)(图 2)。总的来说,在真极移(TPW)与地球磁场极性反转频率之间存在一良好的相关关系,真极移(TPW)停滞的时期正是地球磁场反转频率降低的时期^[17],而地球磁场反转频率降低的时期也是地球磁场强度很低的时期^[8],它们之间的联系引起人们极大的兴趣,有关的各种假说或工作模型

的热流,上升至地表,形成地幔热点,并影响岩石圈的运动。此外 Courtillot 还推测在 CMB 之下,有一个薄的由地核物质组成的热边界层,它以不同的速率向地核释放相对冷的热流。这些“冷”的热流控制了地磁场极性反转。该边界层的厚度又控制了“冷”热流的释放速度,边界层越薄,向下释放的“冷”热流越少,地磁场极性反转也相应减慢(图 4)。该模型认为地磁场超静磁带发生时, D'' 层不活跃,地核发电机处于低能状态,地磁场强度也相应较低。还有一些人提出了与此类似的模型^[18,19]。

上述两种理论模型虽然都建立在相同事实基础上,却得出了相反的结论,前一模型预言 CNS 期间,地磁场强度很高,后一模型则认为 CNS 期间的地磁场强度低。因此 CNS 期间的地磁场强度高低成了检验上述两种模型的关键,同时也成了地球物理学家们研究的热点。Pick 和 Tauxe^[14]利用东太平洋底玄武质玻璃测出 CNS 起始和结束时的地球磁场强度,分别是现今值的 45%和 25%。这些低强度值似乎

并不支持 Larson 等人提出的超级地幔柱模型。最近还有一些研究表明在 CNS 期间低磁场强度是不连续的,也有一些较高的地磁场强度值(据美国加州大学赵西西博士 1996 年面告)。由于 CNS 期间的地磁场强度资料极为有限,人们目前还不能判断两种模型的正确与否。总之,人们对地球磁场变化与核—幔动力学关系的认识仍在争论和推测之中,已建立的一些理论模型还都存在这样那样的问题,但毕竟在探讨地球磁场与热场耦合关系的道路上迈进了一步,为地球系统的研究提供了思路。

在讨论地磁场强度与其它相应现象关系时,Prevot 等人^[8]综合了前人工作,作出了比较清楚的论述,可以看到 D'' 层结构演变最为关键,当 D'' 厚度变大时,由外地核穿过 CMB 层的传导热流变小,导致液态外地核对流强度减弱,提供给地核发电机的能量减少,地磁场极性反转频率及地磁场强度也相应降低。此时地幔较平静,真极移速率低。反过来,由于 D'' 层内局部热失衡,在热量集中的部位形成地幔柱,地幔柱的上升不仅加快了地幔对流及真极移的速率,而且还致使 D'' 层减薄,加快外地核对流强度,增加了地核发电机的能量,使地磁场强度及极性反转

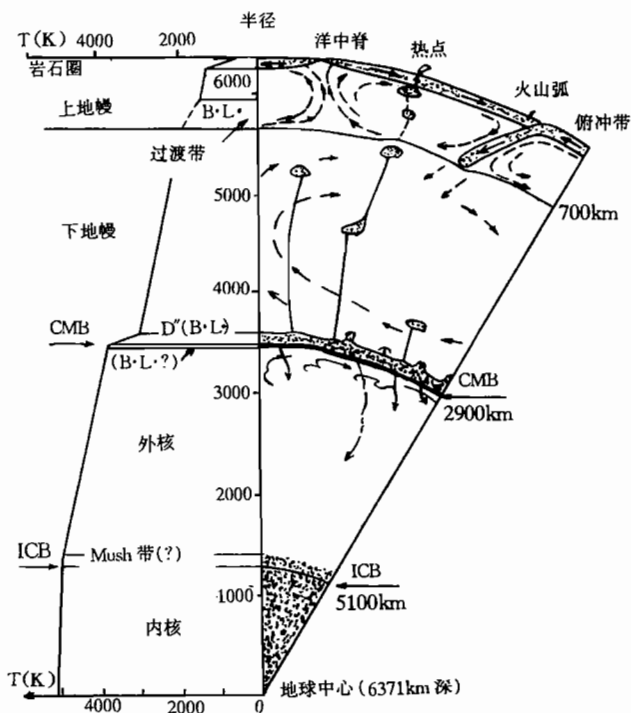


图 3 超级地幔柱形成和核—幔边界传导热流与外地核对流关系
(据 Larson, Olson^[5])

Fig. 3 Response of core—mantle boundary conductive heat flow and outer core convection to a superplume episode
(after Larson, Olson^[5])

B. L. —边界层; ICB—内外核界面; CMB—核—幔边界
B. L. —Boundary layer; ICB—inner core boundary;
CMB—core—mantle boundary

频率增高。

4 面临挑战的地质学

地球系统论将地核、地幔、地壳以及上覆的水圈、气圈看作一个统一的物质系统,探讨各圈层的相互作用及动力来源。近几年来地球物理学家通过古地磁学这一途径把核—幔边界的磁场变化与地球表层的构造热演化结合起来,探讨了它们间可能的相关性^[20]。尽管对相关性的认识还有待于检验,然而这一探索已经显示出其重要的科学意义。在不同学科的交叉与渗透方面地球物理学者走前了一步,在空间上他们抓住了地球的不同圈层,在时间上抓住了地质作用十分活跃的中生代,利用本学科的优势,汲取地质学研究的新进展,取得了目前的研究成果。

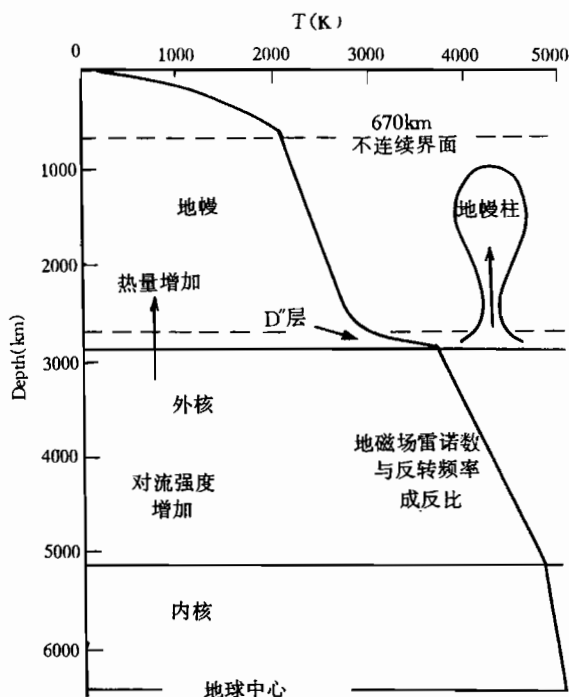


图4 核—幔耦合关系示意图(据 Courtillot 等^[17])

Fig. 4 Schematic diagram of core—mantle coupling
(after Courtillot et al.^[17])

作为地球科学的重要组成部分——地质学科如何面对本世纪地球科学的第三次挑战,又如何发挥地质学的优势,结合相邻学科的新进展为地球系统研究贡献力量,这是摆在我们面前严峻的任务。地质学的特色就是根据已有的地质记录去追溯历史,找寻规律。新的形势要求地质学向纵深发展,拓宽研究领域,增加研究途径,更加全面地认识我们的地球。如前文所述,古地磁学揭示出 320~250 Ma 和 124~83 Ma 两个长时期的地磁场超静磁带,对照地质演化历史,这正是地球表面强烈扩张的阶段,冈瓦纳大陆的解体,特提斯洋的打开,海山链的形成,大陆玄武岩的溢流等等,按照地球物理学家的观点,超静磁带的出现与核—幔边界升起的地幔柱活

动有关,因此地球表面的扩张必然与地幔柱活动有关。由此看来长期被冷落的地球脉动说(即地球有限膨胀与收缩)必将再次引起人们的关注。

联系到中国,暂且不论举世瞩目的青藏高原的隆升机制,就古老的华北克拉通而言,它也是研究地球系统得天独厚的天然实验室,它不仅保存了最完整的地球历史演化记录,而且有大量中生代地球深部活动的证据。“燕山运动”、“华北地台活化”、“华北断块区”等说法无疑都是中国老一辈学者对华北构造研究的独到见解,从不同侧面反映了华北中生代构造的特殊性,对其形成机理有不同认识。近年来华北发现了一系列中生代的变质核杂岩^[21]、120~100 Ma 的 A 型花岗岩、碱性岩^[22]、闪长质岩石中的地幔包体^[23]、基性岩墙群、京西早中生代坳拉

谷^[24]、冀西北幔凸与热点^[25]。此外,有人论证了中国北方新生代的地幔热柱,还有人通过幔源包体研究推断中国东部软流圈顶界于60km^[26]。近日据刘福田面告,沿北纬38°横穿华北,在670km以上的地震层析剖面显示了距地表70~80km之下存在一个300km厚的低速层,是一个明显的幔隆区。把中、新生代的华北构造演化联系起来,不难发现华北的幔隆始于中生代。中生代表壳构造格局的叠加与变迁,是由深部地幔变动决定的^[27]。其动力来源还有待深入研究。

如前所述,古地磁学为我们着手华北中生代地球系统研究开辟了一个新的途径,是地质与地球物理学科在深层次上结合的生长点。目前我国的地球物理学家已经开始了华北新生代地球磁场古强度的研究^[28]。可以相信不久的将来,地质、地球化学、地球物理等不同学科将协力向地球系统研究方向迈进,对华北中生代活化的深部过程,对青藏高原的隆升机制,对古大陆的开合、增生与改造,乃至对地球的脉动等一系列机理性的探讨,会有一个更深入的认识。

参 考 文 献

- 1 何国琦,李茂松. 论地球系统. 北京大学学报(自然科学版),1998,34(2~3):370~378.
- 2 Maruyama S. Plume tectonics. Jour. Geol. Soc. Japan, 1994, 100(1): 24~49.
- 3 Kent R W, Storey M, Saunders A D. Large igneous provinces: Sites of Plume impactor plume incubation? Geology, 1992, 20: 891~894.
- 4 Song X, Richards P G. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core. Nature, 1996, 382: 221~224.
- 5 Larson R L, Olson P. Mantle plumes control magnetic reversal frequency. Earth Planet. Sci. Lett., 1991, 107: 437~447.
- 6 Johnson H P, Pariso J E. Variations in Oceanic Crustal magnetization: systematic changes in the last 160 million years. J. of Geophys. Res., 1993, 98: 435~445.
- 7 刘椿. 古地磁学导论. 北京:科学出版社. 1991.
- 8 Prevot M, Derder M E, McWilliams M, Thompson J. Intensity of the earth's magnetic field: evidence for a Mesozoic dipole low. Earth and Planetary Science letters, 1990, 97: 129~139.
- 9 Bol'shakov A S, Solodovnikov G M, Vechfinsky V S. Determination of the geomagnetic field strength in the late Cretaceous period from the magnetization of burned rocks. Izv. Earth Phys., 1978, 14: 904~910.
- 10 Bol'shakov A S, Solodovnikov G M. Geomagnetic field strength in the late Jurassic. Izv Earth Phys., 1980, 16: 848~857.
- 11 Bol'shakov A S, Solodovnikov G M. Geomagnetic field intensity in Armenia in the late Jurassic and early Cretaceous. Izv. Earth Phys., 1983, 19: 976~982.
- 12 Bol'shakov A S, Solodovnikov G M, Vinogradov Yu K. Paleointensity of the geomagnetic field in the early and middle Jurassic. Izv Earth Phys., 1987, 23: 324~333.
- 13 Perrin M, Prevot M, Mankinen E A. Low intensity of the geomagnetic field in Early Jurassic time. J. Geophys. Res., 1991, 96: 14197~14210.
- 14 Pick T, Tauxe L. Geomagnetic paleointensities during the Cretaceous normal superchron measured using submarine basaltic glass. Nature, 1993, 266: 238~242.
- 15 Sherwood G, Shaw J, Baer G, Mallik S B. The strength of the geomagnetic field during the Cretaceous quiet zone: Palaeointensity results from Israeli and Indian lavas. J. Geomagn. Geoelectr., 1993, 45: 339~360.
- 16 Kostrov A A, Prevot M, Perrin M, Shashkov V A. Paleointensity of the Earth's magnetic field in the Jurassic: New results from a Thellier Study of the Lesotho Basalts, southern Africa. J. Geophys. Res., 1997, 102: 24859~24872.
- 17 Courtillot V, Besse J. Magnetic field reversals, polar wander, and core—mantle coupling. Science, 1987, 237: 1140~1147.
- 18 McFadden P L, Merrill R T. Geodynamo energy source constraints from paleomagnetic data. phys. Earth Planet. Inter., 1968, 43: 22~33.
- 19 Loper D L, McIlartney K. Mantle plumes and the periodicity of magnetic field reversals. Geophys. Res. Lett. 1986, 13: 1525~1528.

- 20 Zhu R X, Tschu K K. Preliminary study on the Relationship Between D" Layer and the Geomagnetic Polarity Transition. *Chinese J. Geophys.*, 1995, (2): 196~202.
- 21 宋鸿林. 变质核杂岩研究进展、基本特征及成因探讨. *地学前缘*, 1995, 2(1): 103~112.
- 22 许保良等. 燕山地区碱性—过碱性 A 型花岗岩系—岩石学、岩石成因学及其地球动力学意义. 见: 北京大学地质学系编. *岩石圈地质科学*. 北京: 地震出版社, 1994. 1~20 页.
- 23 许文良等. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体. 北京: 地质出版社, 1993.
- 24 马文璞, 刘昂. 北京西山——一个早中生代拗拉谷的一部分. *地质科学*, 1986, 1: 54~63.
- 25 李红阳等. 热点与成矿——试论冀西北金、银多金属成矿区壳幔成矿机制. *有色金属矿产与勘查*, 1996, 5(2): 81~88.
- 26 徐义刚, 林传勇等. 中国东部上地幔温度线及其地质意义. *中国科学*, 1995, 25(8): 874~881.
- 27 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 张展桥. 华北北部在古亚洲域与太平洋域构造叠加过程中的地质作用. *中国科学*, 1997, 27(5): 390~394.
- 28 朱日祥, 吴汉宁, Laj C, 李春景. Upper Jaramillo 极性转换期间地球磁场变化特征. *地球物理学报*, 1995, 38(1): 25~33.

Latest Progress in the Study of the Earth System and the Core—Mantle Boundary Dynamics

Shao Ji'an

Han Qingjun

(Peking University, Beijing, 100871) (Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)

Abstract

In this article, advances in the study of the geomagnetic field over the last decade, especially changes in the Mesozoic geomagnetic field, are introduced. It is unveiled that during most of the Mesozoic (200~100 Ma) the paleointensity of the geomagnetic field was very low, only one-third of the mean Cenozoic value, that the geomagnetic field shows no reversals from 124 to 83 Ma, and that the true polar wander (TPW) almost remained a standstill from 170 to 110 Ma. Simultaneously, the earth surface is characterized by great unrest with many remarkable geological and geophysical processes, such as episodic mantle convection, plume activity, sea-floor spreading, changes in global temperature and oil generation. The coincidence of these phenomena indicates some form of coupling among the core, mantle and earth surface activities. To comprehend the coupling, some schematic theoretical models which connect changes of the geomagnetic field with the core—mantle boundary dynamics have been constructed in recent studies. Two main models are introduced and compared with each other. Finally, some valuable earth dynamics questions, which are the third challenge in the geoscience and need further research by geologists and geophysicists, are put forward in light of the latest progress in the study of Mesozoic geology of North China.

Key words: earth system; paleointensity of the geomagnetic field; geomagnetic reversal frequency; true polar wander; mantle plume

作者简介

邵济安, 女, 1940 年生, 1965 年毕业于北京大学地质系。现任北京大学综合技术研究所教授, 主要从事构造地质学研究。通讯地址: 100871, 北京大学综合技术研究所; 电话: (010) 62785155; 电子信箱: wangcc@mail. tsinghua. edu. cn。