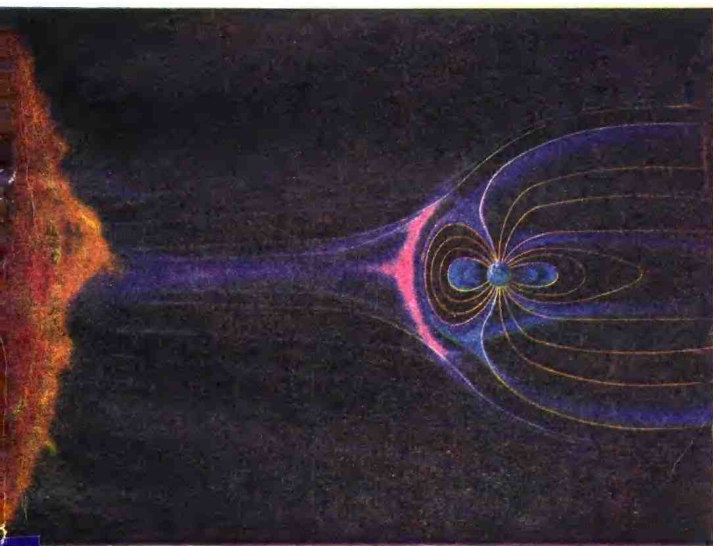


涂传诒 等 编著

日地空间物理学

(行星际与磁层)

下 册



科学出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了发生在日地空间(行星际和磁层)中的各种物理过程及其基本理论和研究方法,全书分为上、下两册。

上册主要讨论行星际空间中的磁场、等离子体、高能粒子的特性以及太阳风与行星磁层的相互作用,此外还简要介绍了太阳物理的主要内容。

下册首先讨论发生在地球磁层中的主要物理过程,包括磁层中的磁场、电场、电流、等离子体、高能粒子、波动和磁层亚暴等,然后阐述了各种日地相关现象,主要包括与太阳爆发,太阳自转以及太阳长期变化相关的地磁、电离层、高层大气以及气象和气候等地球物理现象,最后简要介绍空间等离子体的理论描述。

本书可供从事空间物理、地球物理、天体物理、等离子体物理、磁流体力学、空间科学和航天工程等专业以及其他关心空间环境和空间等离子体物理的科学工作者和高等院校师生参考。

日 地 空 间 物 理 学

(行星际与磁层)

下 册

徐传治 等 编著

责任编辑 方开文

科 学 出 版 社 出 版

北京朝内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1988年10月第 一 版

开本: 787×1092 1/16

1988年10月第一次印刷

印张: 插页: 2 27 1/2

印数: 0001—900

字数: 639,000

ISBN 7-03-000097-8/P·13

定价: 11.00元



图6.3-1a 典型的幕状极光(Alaska大学, 地球物理研究所, L.Snyder).



图6.3-1b 沿着光幕延伸的方向看去的极光(Alaska大学,
地球物理研究所, M.Lockwood)

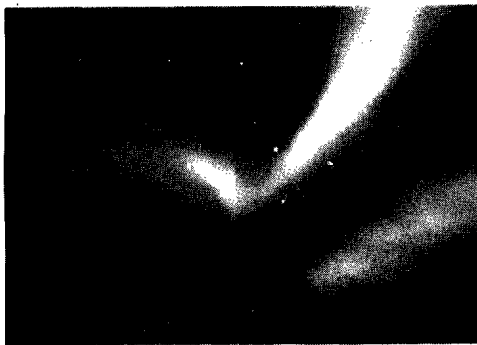


图6.3-1c 冕状极光(Alaska大学, 地球物理研究所, G.Cresswell)。



图6.3-1d 红色极光(Alaska大学, 地球物理研究所, V.Hessler)。

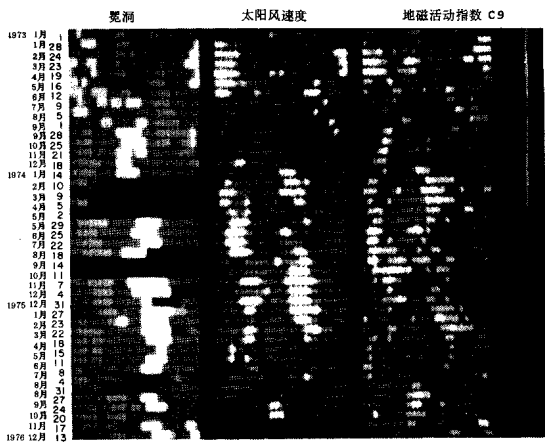


图10.2-3 太阳冕洞，相应磁场极性，1AU处太阳风速度和地磁C9指数按太阳Bartels自转周的排列（详见正文，引自Sheeley等，1976）。

目 录

第六章 地球磁层中的场和等离子体	(1)
§6.1 磁层中的磁场	(2)
1. 地球基本磁场	(2)
2. 偶极子场和地磁坐标	(7)
3. 磁层磁场	(13)
4. 地磁场的周日变化	(16)
5. 电离层电导率和发电机理论	(17)
6. 地磁活动指数	(22)
§6.2 磁层中的等离子体	(23)
1. 等离子体边界面	(23)
2. 极尖区等离子体	(27)
3. 等离子体片	(27)
4. 等离子体层	(31)
5. 其他等离子体区域	(33)
§6.3 极光粒子和场向电流	(33)
1. 极光和极光椭圆	(33)
2. 极光与电子和质子沉降	(38)
3. 极光与场向电流	(43)
§6.4 磁层电场和磁层等离子体对流	(47)
1. 极区电场分布和场向电流	(47)
2. 对流电场和旋转电场	(50)
3. 磁层等离子体在极区和赤道面的对流	(52)
4. 磁层等离子体对流和极区电离层电流的耦合	(55)
5. 赤道面内对流运动和极区电离层内的电流分布的自洽解	(56)
6. 磁层等离子体在子午面内的对流	(61)
§6.5 磁层等离子体对流驱动模式	(64)
1. 太阳风粒子动量和能量向磁层内的输运	(64)
2. 重联磁层模式	(65)
3. 粘性驱动磁层模式	(70)
§6.6 磁层顶和磁尾中性片的内部结构	(74)
1. 磁层顶结构的观测	(75)
2. 单粒子轨道理论预计的磁层顶结构	(77)
3. 等离子体动力学预计的磁层顶结构	(79)
4. 准静态重联理论预计的磁层顶结构	(82)
5. 磁通量传输事件和动态重联理论	(88)
6. 磁尾中性片的结构和真空重联理论	(92)
参考文献	(94)

第七章 地球磁层中捕获的高能粒子(辐射带) (102)

§7.1 带电粒子在地磁场中的运动	(103)
1. 带电粒子在偶极子磁场中的运动	(103)
2. 带电粒子在实际磁层磁场中的运动	(107)
§7.2 磁层的不变量坐标和辐射带的描述	(111)
1. 关于捕获粒子的刘维定理	(111)
2. 不变量坐标和捕获粒子的通量图	(113)
3. 辐射带质子	(118)
4. 辐射带电子	(125)
§7.3 捕获粒子的扩散	(127)
1. 衰减不变量的破坏, 粒子的扩散和沉降	(127)
2. 投掷角扩散	(131)
3. 径向扩散	(141)
§7.4 辐射带平衡结构的理论计算	(148)
1. 辐射带质子的平衡分布	(148)
2. 辐射带质子的平衡分布	(150)
参考文献	(152)

第八章 地球磁层中的波动 (154)

§8.1 磁鞘中的波动及其向磁层中的传输	(157)
1. 磁鞘中的波动	(157)
2. 磁鞘中的波动向磁层内的传输	(159)
§8.2 磁层顶邻近区域的波动	(164)
1. 在磁层顶的邻近区域磁场和电场起伏的观测	(161)
2. 磁层顶的Kelvin-Helmholtz不稳定性	(164)
3. 磁层顶邻近的离子回旋不稳定性	(167)
4. 磁层顶邻近的低混杂漂移不稳定性	(173)
§8.3 磁层中的磁脉动	(178)
1. 地磁脉动的分类及主要的观测结果	(180)
2. 在单色外源作用下磁层内Alfvén波的共振激发	(191)
3. 在宽频带外源作用下在等离子体层顶激发的表面波	(194)
4. 质子回旋不稳定性激发的波动	(196)
§8.4 磁层中的哨声和甚低频发射	(199)
1. 哨声和甚低频发射的观测	(199)
2. 哨声在等离子体层中的传播	(207)
3. 等离子体层哨声的准线性理论	(212)
参考文献	(215)

第九章 地球磁层亚暴 (219)

§9.1 磁层亚暴期间在极光椭圆带上层大气中发生的现象	(219)
1. 极光亚暴	(220)
2. 极光粒子的加速	(220)
3. 磁层亚暴和AE指数	(225)

4.	极电射光流的形成	(228)
§9.2	磁层亚暴期间在磁尾中发生的现象	(231)
1.	等离子体片的变薄和膨胀	(231)
2.	等离子体片中等离子体能量的增加	(235)
3.	等离子体片中的等离子体流	(236)
4.	磁尾磁场的变化	(238)
5.	亚暴期间磁尾变化的形态学模式和可能的机制	(240)
§9.3	磁层亚暴期间在内磁层发生的现象	(243)
1.	等离子体的注入和对流电场的侵入	(244)
2.	注入质子的东向漂移和注入电子的西向漂移	(245)
3.	磁流波和甚低频发射	(248)
4.	漂移电子和漂移质子的沉降	(250)
5.	等离子体层的收缩和变形	(254)
§9.4	频繁发生的磁层亚暴——磁暴	(257)
1.	地磁暴的形态	(257)
2.	Dst指数和Asy指数	(261)
3.	磁暴——频繁发生的亚暴	(262)
4.	环电流	(263)
§9.5	磁层亚暴与太阳风参数的相关	(265)
1.	亚暴活动与行星际激波的相关	(265)
2.	亚暴活动与行星际磁场南向分量的相关	(265)
3.	亚暴活动与能量耦合函数的相关及与行星际电场的关系	(266)
4.	地磁暴与太阳风参数的相关	(269)
§9.6	磁层亚暴的能量来源和亚暴模式	(272)
1.	磁层亚暴的能量耗散	(272)
2.	磁层亚暴耗散的能量来源	(273)
3.	磁层的“基态”	(274)
4.	磁层对行星际磁场的响应	(275)
5.	亚暴的形态	(279)
6.	亚暴中性线模式	(281)
7.	亚暴稀疏波模式	(283)
参考文献		(286)
第十章	日地相关现象	(292)
§10.1	与太阳爆发相关的地球物理现象	(292)
1.	概述	(292)
2.	电离层突然骚扰 (SID)	(297)
3.	极盖吸收事件 (FCA)	(300)
4.	磁暴	(302)
5.	热层的磁暴效应	(305)
6.	电离层暴	(318)
7.	与太阳耀斑和磁暴相关的低层大气现象	(327)
§10.2	与太阳自转和行星际共转结构相关的地球物理现象	(328)

1. 与行星共转结构相关的地磁活动	(328)
2. 与行星共转结构相关的低层大气现象	(331)
3. 与太阳自转相关的电离层吸收现象	(334)
§10.3 与太阳长期变化相关的地球物理现象	(335)
1. 太阳耀斑引起的地球物理事件发生频次的太阳周年变化	(335)
2. 电离层及上层大气特性的太阳周年变化	(337)
3. 太阳活动与气象的相关	(339)
4. 太阳活动与气候变迁的相关	(343)
参考文献	(345)

第十一章 空间等离子体的理论描述 (349)

§11.1 带电粒子在磁场中的运动	(350)
1. 带电粒子的引导中心在缓变磁场中的运动	(351)
2. 带电粒子在缓变磁场中运动的逐渐不变量	(357)
3. 带电粒子在缓变磁场中运动时能量的变化	(360)
4. 高能带电粒子在偶极子场中的运动轨道	(361)
§11.2 空间等离子体的磁流体力学描述	(373)
1. 动力论方程和矩方程	(374)
2. 由电子和质子组成的一元各向同性磁流体力学方程组	(380)
3. 一元各向异性磁流体力学方程组	(384)
4. 多元各向异性磁流体力学描述	(385)
§11.3 空间等离子体动力学和反常输运过程	(389)
1. 均匀磁化无碰撞等离子体中的波动	(390)
2. 波粒子相互作用与不稳定性	(411)
3. 静电波粒子相互作用的准线性发展和反常输运过程	(419)
参考文献	(431)

本书封面采用K. Endo为1985年举行的讨论太阳风磁层耦合的AGU-Chapman大会所绘的彩图。

第六章 地球磁层中的场和等离子体

导电率无穷大的太阳风把地球磁场限制在一个有限的空间内，这个空间称为磁层。磁层与太阳风交界处的过渡区称为磁层顶。磁层顶的厚度大约为400—1000公里的量级。在向日侧，磁层顶近似为半球形，磁层顶对日点的地心距离约为 $10-12R_E$ （ R_E 为地球半径）。在背日侧，磁层顶被拉成很长的圆柱形，圆柱的半径约为 $20R_E$ 。圆柱内的空间称为磁尾，磁尾可一直伸展到太阳风下游 $1000R_E$ 的地方。图6-1示出了磁层内磁力线的位形。由图看到，由较低纬度发出的磁力线是闭合的，而由地球两高纬区域发出的磁力线被拖到地球后面形成一开磁力线（非闭合的）的区域，即磁尾，相应南北两高纬区域称为极盖区。磁尾中由南半球“发出”的磁力线与“进入”北半球的磁力线被一个电流片分开，电流片的厚度大约为1000公里。电流片中的磁场值很小，因而也称为

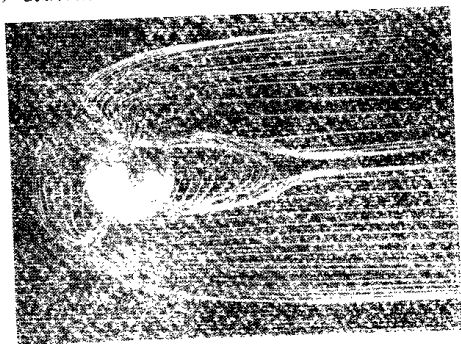


图6-1 磁力线示意图。太阳风把从极盖区发出的磁力线拖到地球后面形成磁尾（引自Poelgeron, 1976）。

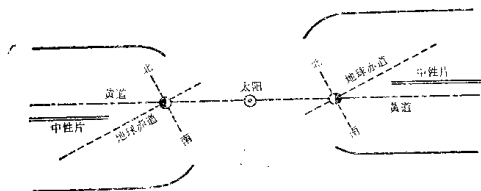


图6-2 中性片位置示意图。

中性片。中性片大致平行于黄道面，但是向着地球赤道面的方向移动了几个 R_E 的距离，见图6-2。

磁层中充满着低能等离子体和高能带电粒子。主要的低能等离子体区域有边界层等离子体、等离子体片、极尖区等离子体和等离子体层。高能带电粒子存在的区域称为辐射带，位于闭合磁力线区域内。

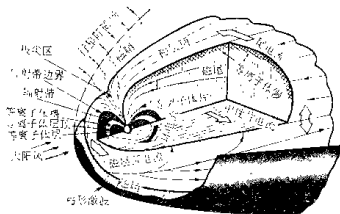


图6-3 磁层结构示意图。图中标出了磁层中各等离子体区域和辐射带的位置（引自Willis, 1978）。

在图6-3中标明了上述等离子体区域和辐射带的位置。本章主要讨论磁层磁场和磁层中低能等离子体的特性，而辐射带的特性在下一章讨论。

在外磁层中（辐射带和等离子体层之外）各区域的等离子体都处于被称做磁层对流的同一运动系统之中。经过一个循环运动之后，粒子或沉降在高纬上层大气之中或由向阳面磁层顶向外

逃逸。虽然已经发现高纬电离层直接向磁层高纬区和等离子体片注入离子，但是外磁层中的等离子体主要起源于太阳风，是什么物理机制把太阳风的粒子、动量和能量输送到磁层中来的问题是正在研究中的课题。Dungey (1961) 提出行星际磁力线与地球磁力线重联的机制，Axford和Hines (1961) 提出粘性层传输机制。前者认为地球高纬区域发出的磁力线与行星际磁力线相互连接，磁层顶是旋转间断面，太阳风沿着磁力线进入磁层，这一模式又称开磁层模式；后者认为由地球发出的磁力线是闭合的，磁层顶是切向间断面，通过在磁层顶的某种粘性作用，太阳风把粒子的动量及能量传入磁层。这后一模式又称为闭磁层模式。开磁层模式要求在磁层顶向阳侧存在着磁重联过程，而闭磁层模式则要求在磁层顶有某种反常输运过程。虽然这两种过程都尚未完全被观测证实，但是存在着对这两种模式各自有利的观测事实。ISEE飞船的观测表明这两种机制可能是同时存在的。看来，把这两种模式结合起来的想法是有希望的。

§ 6.1 磁层中的磁场

1. 地球基本磁场

地球表面附近的磁场强度，在赤道约为0.3高斯¹⁾，在极区约为0.6高斯，磁场方向大致由南向北。地磁场按其变化的时间尺度可以分为两部分：长期变化和短期变化。长期变化的时间尺度为数十年，它是地磁场的主要部分（约占99%），称为基本磁场。一般认为基本磁场是由地球内部熔化的金属核中的流体运动激发的电流引起的。短期变化是指在不大于1秒至数小时的时间范围内发生的变化，变化幅度很小，一般在几个 γ 至几

1) 按国务院颁布的我国法定计量单位的规定，高斯和 γ （伽马）为非法定计量单位，法定计量单位为特斯拉，其关系为1高斯=10⁻⁴特斯拉，1 γ =10⁻⁹特斯拉。

百个 γ ($1\gamma = 10^{-5}$ 高斯) 之间。在地面观测到的这部分磁场称为变化磁场。它是由电离层和磁层中的电流引起的。下面首先讨论如何描述地球基本磁场。

要完全描述空间某一点的磁场需要三个完全独立的坐标量。通常取向下局地直角坐标系； z 轴由地面铅直向下， x 轴沿着地理子午线向北， y 轴沿着纬度圈指向东，见图6.1-1。任意磁场矢量 $\mathbf{B}$ 在这坐标系中可表示为

$$\mathbf{B} = \{B_x, B_y, B_z\},$$

B_x 称为地磁场的北向分量，有时用 X 表示， B_y 称为地磁场的东向分量，有时记为 Y ， B_z 称为地磁场的垂直分量，有时记为 Z 。通常，地磁场用另外三个独立的量来表示：（1）水平分量 H ，它是总磁场矢量 $\mathbf{B}$ 在水平面上的分量；（2）磁偏角 D ，即水平分量 H 与北向之间的夹角（由北转向东为正值）。（3）磁倾角 I ，即总磁场矢量 $\mathbf{B}$ 与水平面之间的夹角（由水平面向下为正值）。在地球表面磁倾角为 90° 的点称为磁极，北半球的磁极称为磁北极，南半球的磁极称为磁南极，北半球的磁倾角都是正值，南半球的磁倾角是负值。上述这些描述地磁场的参量通称为地磁要素。各要素之间有下面的关系：

$$B_x = H \cos D, B_y = H \sin D, B_z = H \tan I.$$

人们不可能测量地面上每一点的地磁要素，测点总是有限的。下面讨论如何通过地面有限点的测量来描述地磁场。假定基本磁场的源在地球内部，地表面以上空间内的磁势 V 满足方程：

$$\nabla^2 V = 0, \quad (6.1-1)$$

在球坐标系中利用分离变量法可以得到如下形式的解：

$$V = R_E \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (R_E/r)^{n+1} (q_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)) P_n^m(\cos\theta), \quad (6.1-2)$$

式中 R_E 为地球半径， r 为地心到场点的距离， θ 是地球余纬（即极角）， ϕ 是经度， $P_n^m(\cos\theta)$ 为 n 次 m 阶的缔合勒让得多项式， q_n^m 、 h_n^m 是由地球表面实测的磁场数据确定的系数（称为高斯系数）。由势函数的梯度给出地面的磁场：

$$B_x = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}, B_y = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi}, B_z = -\frac{\partial V}{\partial r}. \quad (6.1-3)$$

通过地面有限点的观测可以定出级数(6.1-2)式中前几项的系数。如果考虑到地球外部的源，还要在 V 的展开式中加上 $(r/R_E)^n$ 项。图6.1-2a和图6.1-2b分别为用球谱分析得到的1965年磁倾角 I 的等值线及总磁场强度的等值线图，图6.1-2c给出了1985年国际参考地磁场 B 等值线分布。关于1965年国际参考地磁场可参阅J. Geophys. Res., 74, 4407, 1969；关于1975年国际参考地磁场可参阅J. Geophys. Res., 81, 5163, 1976；关于1985年国际参考地磁场可参阅EOS, 67, 523, 1986。

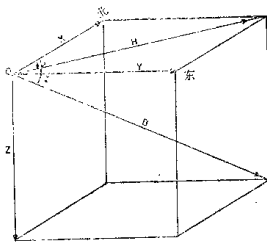


图6.1-1 描述地磁场的局地坐标系。

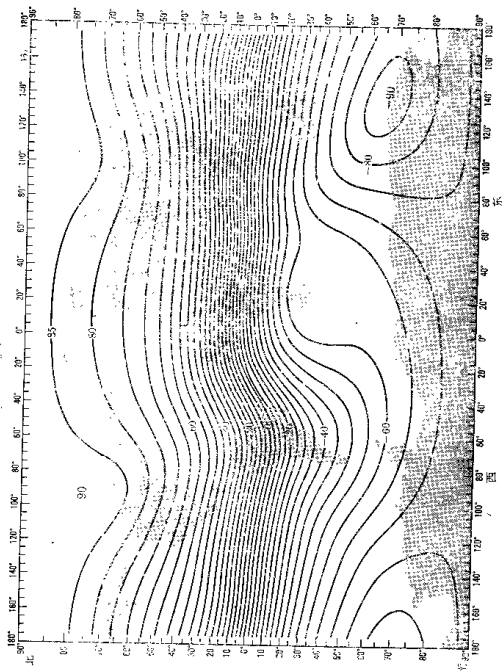


图6.1-2a 1965年国际参考地磁与磁倾角I等值线图 (Cain 和 Cain, 1968, 转引自 Akasofu 和 Chapman, 1972).

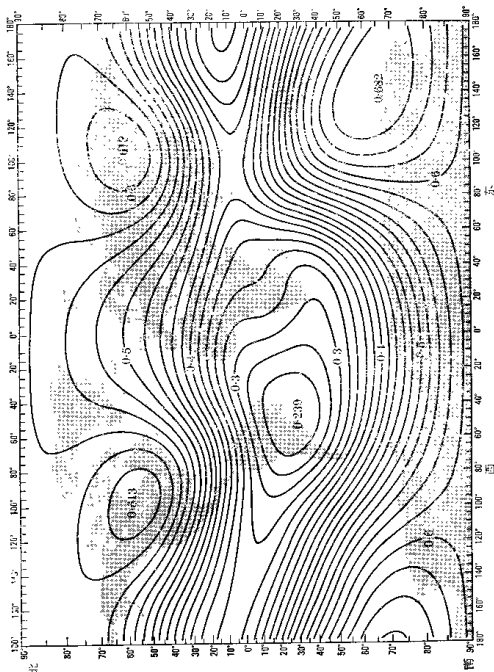


图6.1-2b 1965年国际参考海温场及海温 D 等值线图 (Cain 和 Cain, 1968, 转引自Akasofu 和 Chapman, 1972).

1985 年国际参考地磁场

等值线间距 = 1000

VAN DER GRINJEN 投影

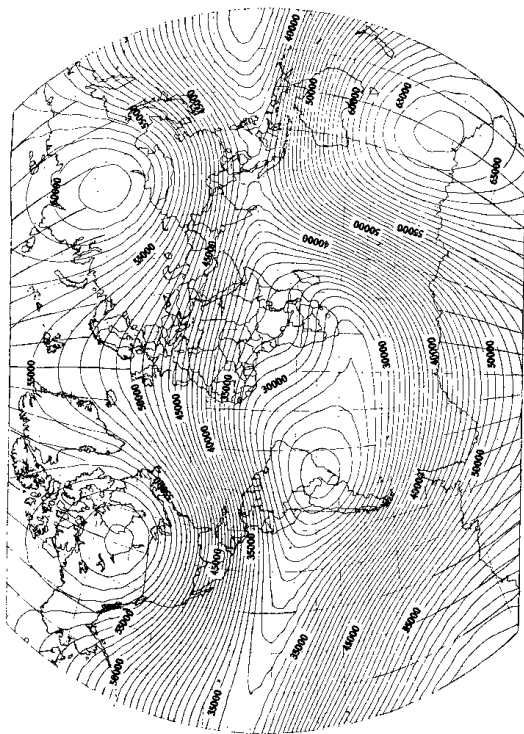


图6.1-2c 1985年国际参考地磁场等值线图，等值线间距为1000γ
(引自 IAGG, 67, 536, 1986)。

因为小范围的磁异常不易用球谐展开式表示出来,用上述方法计算的磁场值在靠近地面处误差较大,而在离地面较远的地方与实际磁场较为接近.为了反映磁场在小范围的变化,在局部磁场分析中广泛采用泰勒级数法、样条函数法和矩谱分析法,徐文耀和朱岗昆(1984)详细介绍了这些方法各自的优越性和局限性,这里不再进一步讨论了.

2. 偶极子场和地磁坐标

观测表明,磁势 V 的球谐展开的第一项

$$V_1 = (R_E^3/r^2) [q_1^0 \cos \theta + (q_1^1 \cos \phi + h_1^1 \sin \phi) \sin \theta] \quad (6.1-4)$$

的值最大. V_1 可以看作一个位于地球中心 O 的磁偶极子引起的磁势,偶极子的磁势为

$$V_1 = -\frac{M \cos \theta'}{r^2}, \quad (6.1-5)$$

式中 $M = H_0 R_E^2$ 为偶极矩, $H_0^2 = (q_1^0)^2 + (q_1^1)^2 + (h_1^1)^2$. 在1965年, $M = 0.3095 R_E^2$ 高斯·厘米³. 偶极矩的方向是指向南的,偶极子轴与北半球的交点 B 称为地磁北极(或称磁偶极子北极), θ' 为观测点至地磁北极的大圆弧度. 在地理坐标中,地磁北极的余纬为 θ_0 , 经度为 ϕ_0 , 令 $\theta_0 = 180^\circ - \theta_A$, $\phi_0 = 180^\circ + \phi_A$. 在1965年地磁北极的余纬 $\theta_0 = 11.4^\circ$, 经度 $\phi_0 = -69.8^\circ$. θ_A 和 ϕ_A 可用高斯系数表示:

$$\cos \theta_A = q_1^0 / H_0, \quad \sin \theta_A \cos \phi_A = q_1^1 / H_0, \quad \sin \theta_A \sin \phi_A = h_1^1 / H_0.$$

偶极矩的数值 M 有长期变化. 图6.1-3给出了近百年来偶极矩的变化. 图6.1-4示出了6000年以来磁偶极矩的变化. 中心偶极子轴与北半球表面的交点(地磁北极)也有长期变化. 图6.1-5示出了近6000年来地磁北极的移动曲线. 同样,地磁南极的位置也有长期变化. 这里需要指出的是,在古地磁学的研究工作中不用上述高斯展开的方法,通常是在地磁场是中心磁偶极子场的假设下,根据单点测量数据推算偶极矩的大小和偶极轴的方向,然后再将不同点换算的信用适当的方法加以平均. 图6.1-4和图6.1-5中的等效偶极矩和虚地磁极的位置就是这样得到的. 魏青云等(1980)对古地磁学中几种常用的处理方法作了详细的说明.

由球谐展开系数可以看到偶极子场是实际地磁场的较好的近似. 在近地空间偶极子场描述导致的误差约为10%左右,在3—6 R_E 范围内误差为1%,在6 R_E 以外的空间不能应用偶极子场来描述地磁场,因为在这个区域,磁层电流系产生的磁场不能忽略. 在近地空间测量到的磁场对中心偶极子场模式的偏离称为地磁异常,它是由地核电流系的高极矩,地壳中铁磁物质的集中,

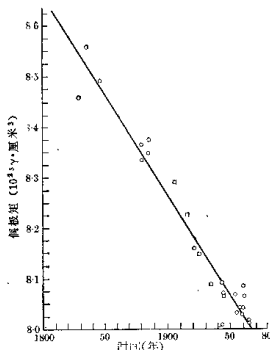


图6.1-3 近200年来地球磁偶极矩的变化
(引自McDonald和Gunst, 1967).