

磁暴期间环电流的纬向移动与倾斜现象

陈博, 徐文耀, 陈耿雄, 杜爱民, 吴迎燕, 刘晓灿

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

中国科学院研究生院, 北京 100049

中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

E-mail: chenb@mail.iggcas.ac.cn

2007-12-17 收稿, 2008-05-14 接受

国家自然科学基金重点项目(批准号: 40436016)、中国科学院知识创新工程方向性项目(批准号: KZCX3-SW-144)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB806305)资助

摘要 赤道环电流理论预言其水平分量磁扰在地面上的纬度分布, 有着以赤道面为中心按照地磁纬度余弦而递减的规律. 然而, 在地磁观测记录中发现, 磁暴期间最大水平分量下降不是发生在赤道地区, 而是发生在中低纬台站, 并且以这一非赤道地区的磁扰为强度中心, 两侧台站的磁扰记录呈现出余弦递减的规律. 上述观测事实暗示着赤道环电流的强度中心(投影纬度)不在赤道面上, 而是发生了整体倾斜或(和)纬向移动. 分析了 2000~2004 年间的 11 个大磁暴, 研究了环电流的空间分布特征. 结果表明, 环电流相对于磁赤道面发生倾斜, 倾斜角 $\delta_t \approx 13 \sim 25^\circ$, 时常伴随纬向移动 $\delta_s \approx 0 \sim 21.8^\circ$. 不同台站水平分量磁扰 ΔH_k 与纬度 φ_k 的规律可以表述为 $\Delta H_k = \Delta H_{\max} \cos(\varphi_k - \delta)$, 与观测结果符合较好.

关键词

倾斜环电流

磁暴

纬向移动

地磁数据反演

环电流空间位形

磁层中存在着几个大尺度的电流体系, 其中环电流是内磁层中距离地心 2 到 8 个 R_e , 环绕地球的电流系统^[1~4], 其携带的电荷主要起源于太阳风和电离层^[5]. 通常认为, 增强的对流电场是造成带电粒子穿越磁场从等离子片注入到内磁层中^[6]. 被捕获的带电粒子在地磁场的作用下发生梯度曲率漂移, 形成西向环电流, 造成了地面台站水平分量的减小. Le 和 Russell 等人^[7]从卫星磁测数据中反演出环电流在不同磁地方时扇区形态学特征, 发现在 $L = 4 \sim 7$ 之间的存在着很强的西向环电流, 同时在内侧低 L 值的轨道上存有强度较小的东向环电流. Jorgensen 等人^[8]给出了在不同磁扰条件下环电流全球统计结果. 环电流中的高能带电粒子, 其能量分布在 1 到上百 keV 间^[9,10], 由于它们的镜像弹跳周期很短 ~ 10 s, 弹跳平均近似^[11]可以恰当地把单粒子复杂的绝热运动^[12,13]简化为环电流的周向漂移($\sim$ 小时). 这种理论把带状分布的电荷流动等效为环电流, 符合地面台站的地磁观测^[14]. 通常又假定磁场南北对称, 则环电流主要集

中在赤道面上, 赤道环电流的概念很自然地被引入. 在地球附近, 它的磁扰方向平行于地磁轴, 垂直于磁赤道面(图 1(a)).

研究环电流具有重要的科学和应用价值, 首先空间科学这一新兴学科的兴起就是发端于对磁暴的研究, 在其经典理论中, 地面磁场水平分量的大幅度减小归结为赤道环电流的增强. 在早期的地磁学观测中, Chapman 首先提出 D_{st} (Disturbance storm time) 变化来表征暴时磁场对环电流的响应. 20 世纪 60 年代 Dessler 等人^[15]和 Sckopke^[16]的工作表明, 地磁水平分量的扰动正比于环电流所包含的能量, 至此由地磁 H 数据标定的 D_{st} 指数应运而生. 目前 D_{st} 指数作为一种有效地描述环电流强弱的一个重要参数, 在空间天气应用十分广泛. 在空间实测方面, 探测卫星也记录到磁暴期间增强的环电流, 以及对周边磁层位形的影响^[17]. 总之, 环电流对空间环境有着举足轻重的作用, 如果我们能够借助地面分布广泛的地磁台网, 设计一套比较有效地监测空间环电流的方

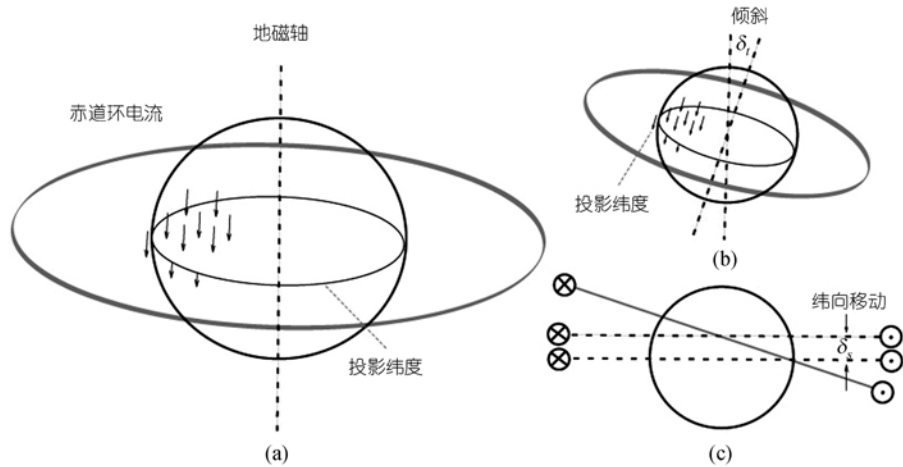


图 1

(a) 磁层中赤道环电流的示意图; (b) 环电流发生倾斜; (c) 倾斜环电流伴随有纬向移动

法, 可以为空间天气实时预报提供参考.

另外对环电流的研究还有如下问题尚待解决:
() 环电流的强度中心(投影纬度)是否集中在磁赤道面上? () 如果不是, 那么环电流的空间分布位形又是如何? () 能不能给予定量上的描述, 来帮助认识和理解环电流与磁层位形及磁尾之间联系. 我们的工作就是从暴时地磁数据中发现并提取那些暗示赤道环电流倾斜现象开始的.

1 数据资料与分析方法

我们所使用的地磁数据来自全球地磁台网 <http://www.intermagnet.org/> 的分钟值. 选择 2000~2004 年间的 11 个典型强磁暴为研究对象, 如表 1 所示. 表中列出磁暴发生日期, 最小 D_{st} 指数(磁暴强度), 以及我们计算样本的时间范围. 表 2 列出了 4 个子午链 32 个台站的位置坐标.

表 1 磁暴列表

编号	磁暴发生日期	采样范围(世界时)	D_{st} 最小值/nT
1	2000-04-06	18:30 23:50	-288
2	2000-07-15	19:30 21:10	-301
3	2000-08-12	06:30 10:00	-235
4	2000-03-31	06:00 08:20	-387
5	2001-04-11	16:00 21:20	-271
6	2001-11-06	01:50 02:45	-292
7	2003-08-18	05:00 07:00	-168
8	2003-10-29	21:00 23:50	-363
9	2003-11-20	15:00 18:00	-472
10	2004-11-10	05:00 08:00	-289
11	2004-07-27	03:20 06:30	-197

表 2 台站列表

台站名称	地理纬度/(°)	地理经度/(°)	地磁纬度/(°)	地磁经度/(°)
MBO	14.38	343.0	20.19	57.35
GUI	28.32	343.6	33.86	60.52
SPT	39.55	355.7	42.84	75.94
EBR	40.82	0.490	43.22	81.26
TAM	22.79	5.530	24.70	81.67
HER	-34.43	19.23	-33.95	83.80
TSU	-19.20	17.58	-18.73	85.64
GUA	13.59	144.8	5.187	215.5
CTA	-20.10	146.3	-28.13	220.9
LZH	36.10	103.8	25.75	175.9
LRM	-22.22	114.1	-32.54	186.3
GNA	-31.80	116.0	-42.07	188.8
KDU	-12.70	132.5	-22.12	205.5
ASP	-23.77	133.9	-33.04	208.1
PHU	21.03	105.9	10.66	177.7
KNY	31.42	130.8	21.76	200.6
KAK	36.23	140.1	27.25	208.6
BMT	40.30	116.2	30.01	186.9
MMB	43.91	144.1	35.24	211.1
MID	28.21	182.6	24.96	249.3
API	-13.80	188.2	-15.39	262.5
HON	21.32	202.0	21.61	269.5
PPT	17.57	210.4	-15.13	285.1
TRW	43.30	294.7	-32.98	5.494
SJG	18.11	293.9	28.43	5.931
PST	-51.70	302.1	-41.57	11.34
KOU	5.210	307.3	15.01	19.52
VSS	-22.40	316.4	-13.17	26.46
DLR	29.50	259.1	38.39	327.1
TEO	19.75	260.8	28.86	330.2
BSL	30.35	270.4	40.15	339.6
HUA	-12.05	284.7	-1.696	356.4

1.1 环电流倾斜的证据

对比图 1(a)和(b)可以看出,一旦环电流发生倾斜,磁扰最强的位置(箭头所在处)会从赤道区域向北(或向南)转移到中低纬度,因此依据地面的磁场观测我们可以判断环电流的倾斜方向和程度.下面给出两个具体事例.

图 2(a)和 2(b)表示的是日本 2 个台站 KAK(地磁纬度 27.25)、MMB(地磁纬度 35.24)在 2004 年 11 月 10 日磁暴期间记录到的 H 分量扰动情况.传统的赤道环电流理论认为:不同纬度台站的水平分量 ΔH 磁扰按照地磁纬度余弦而递减,即较高纬度的 MMB 的 ΔH 应该小于纬度低的 KAK,理论比值约为 $\cos(35.24)/\cos(27.25) = 0.9187$.图 2(b)是 2 个台站磁扰的散点图,其比值为 0.9195,非常接近理论值,表明环电流位于赤道面.

然而对于图 2(c)和 2(d)给出的 2003 年 10 月 30

日磁暴,观测特征则明显不同:MMB 的 ΔH 大于 KAK 台站,相对比值为 1.326,这与通常赤道环电流的认识规律相违背.除非环电流偏斜到离 MMB 台站更近,才有可能使得 KAK 记录到相对小的磁扰,而 MMB 因为更靠近强度中心,磁扰记录要大些.

这样的现象并不少见,因此有必要重新审视我们对赤道环电流的传统认识.本文就是在这样的动机下,用全球地磁台网的观测,来重新构建环电流的空间位形.其依据的原理如下:环电流的不同空间展布位形会使得地面台网在全球磁扰强弱分布经纬图上,呈现出不同的形态特征^[18,19],那么借助地面台网所记录到的环电流带来的磁场分布信息,就可以有效地判断环电流空间分布位形.

1.2 环电流在地面的投影纬度

我们把环电流对地面磁场扰动最强之处,定义为环电流的投影纬度(projective latitude).它对应环

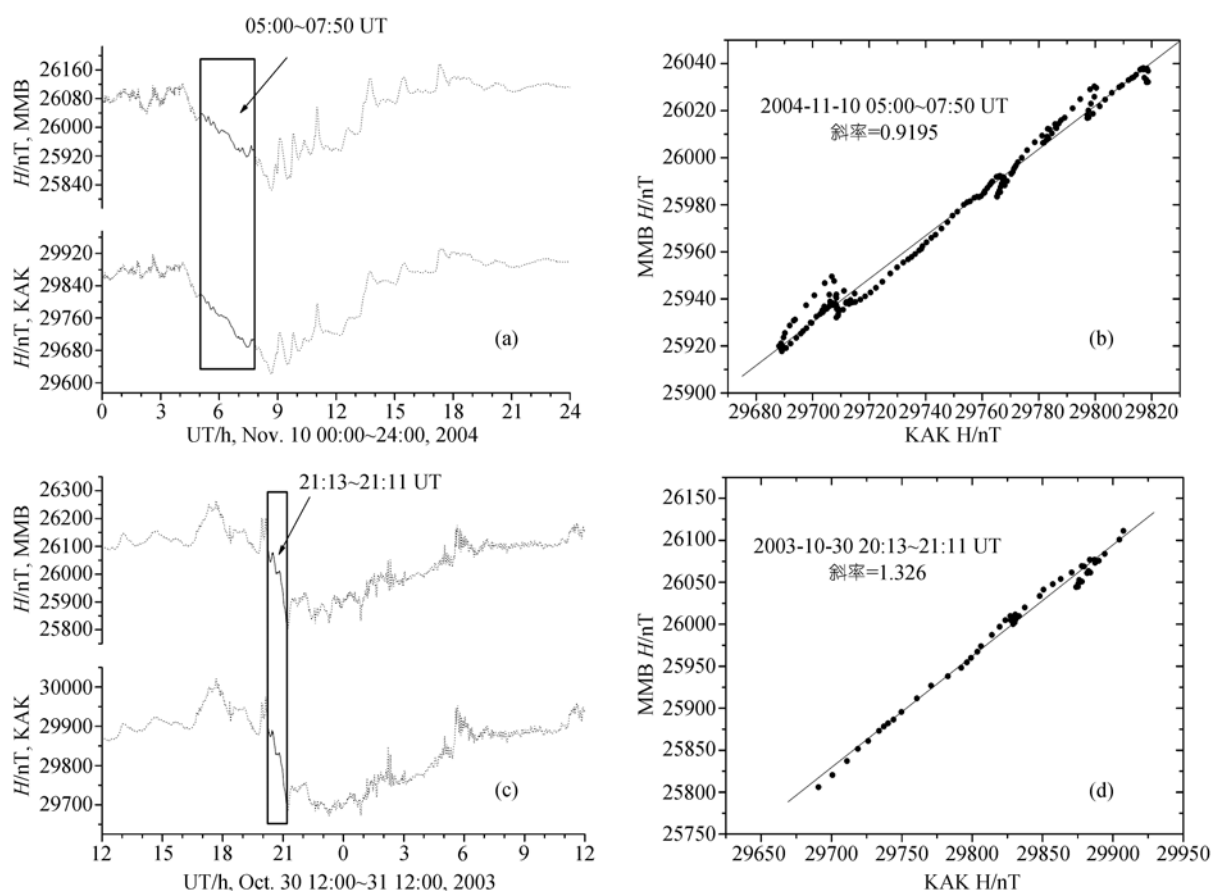


图 2

(a), (c) 2 次磁暴期间日本中低纬 2 个台站 KAK 和 MMB 记录到的地磁水平分量的 D_{st} 变化 (b), (d) 2 个台站 H 水平分量变化的相对比值

电流在地面的强度中心, 处在这一纬度的地面台站对环电流响应最为强烈, 即该台站记录到最大水平分量变化 $\Delta H_{\max}$. 通常认为投影纬度就在磁赤道面上, 即 $\Delta H_{\max}$ 总在赤道面上发生. D_{st} 指数的定义就是把中低纬度台站记录到磁扰先归算到赤道面, 然后再把 4 个不同经度的结果平均一下即可:

$$D_{st} = \frac{1}{4} \sum_{k=1,4} \frac{\Delta H_k}{\cos \varphi_k}, \quad (1)$$

对于已经存在的 D_{st} 指数, Turner 等人^[20]曾指出在确定时 D_{st} 指数磁尾电流的影响不能忽略, 还需考虑磁层顶电流的影响, 这可以通过上游太阳风动压数据来扣除, 目前, D_{st}^* 是经过校正后的指数.

Malin 和 Isikara^[21]在理论上预言了环电流可能相对地球偶极场偏移, Mayaud^[22,23]进一步完善了这一理论, 并称之为 Malin-Isikara 效应, Cliver 和 Kamide 等人^[24]从 D_{st} 指数半年变化中也讨论了环电流的倾斜和纬向移动. 我们的工作目的就是要在磁数据中合理地提取这种现象, 并且给出定量描述. 通常由投影纬度可以判断环电流强度中心的空间分布情况, 下面定义参数可以帮助我们计算出投影纬度.

1.3 环电流的参数

首先, 我们选取同一子午台链的数据, 这是因为不同经度台站的 D_{st} 变化有差异. 另外考虑到 2 个台站之间的间隔, 远远小于它们到环电流的距离, 因此环电流在 2 个台站产生的绝对磁扰大小和方向近似一致. 如 1.1 节第 2 个例子所示, $\Delta H_{\max}$ 往往不在赤道面上, 而是在某一中低纬度, 因此考虑最一般的情况, 设环电流相对地磁赤道面的偏角为 δ , 于是最大磁扰 $\Delta H_{\max}$ 在纬度 δ 处观测到. 任一台站的磁扰可以写成 $\Delta H_k = \Delta H_{\max} \cos(\varphi_k - \delta)$, 2 个台站的磁扰之比为

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta H_i}{\Delta H_j} = \frac{\Delta H_{\max} \cos(\varphi_i - \delta)}{\Delta H_{\max} \cos(\varphi_j - \delta)} = \frac{\cos(\varphi_i - \delta)}{\cos(\varphi_j - \delta)}, \quad (2)$$

φ 代表台站的地磁纬度 $\varphi_i = \varphi_j + \omega_{ij}$, 其中赤道环电流只是投影纬度在赤道面上, $\delta = 0$ 南北对称这一特殊情况. 同样, 对垂直分量 Z 的磁扰有

$$\beta_{ij} = \frac{\Delta Z_i}{\Delta Z_j} = \frac{\Delta H_{\max} \sin(\varphi_i - \delta)}{\Delta H_{\max} \sin(\varphi_j - \delta)}, \quad (3)$$

可以看出 2 个台站的磁扰相除消去了 $\Delta H_{\max}$, 而保留了环电流的几何学特征 δ . 由(2), (3)式我们得到

$$\lambda_{ij} = \frac{1 + \alpha_{ij} \beta_{ij}}{\alpha_{ij} + \beta_{ij}} = \cos \omega_{ij}, \quad (4)$$

显然等式(4)中 λ_{ij} 只是 2 个台站纬度差的函数, 与环电流的倾斜角 δ 无关. 尽管不同磁暴的环电流会有着不同的倾斜角 δ , 但参数 λ_{ij} 应等于常数. 图 3 给出 11 个磁暴的 α 和 λ 值, 可以看出不同磁暴期间的 α 有很大变化, 但 λ 基本不变近似等于余弦值.

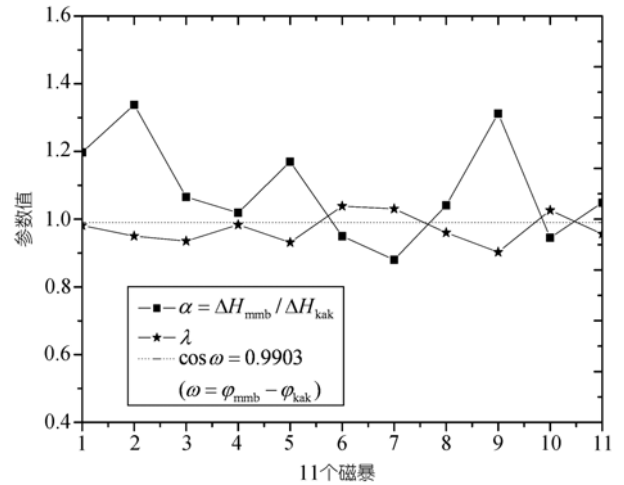


图 3 由(2)和(4)式定义的 α 和 λ 参数, 在 11 个不同磁暴期间的计算值

1.4 从地磁数据中计算 δ

参数的有效性和可靠性的论证参见讨论部分, 下面我们用参数 α 来估算环电流在某个磁暴阶段的投影纬度

$$\frac{d\alpha}{d\omega} = \frac{\alpha - \cos \omega}{\sin \omega} \cos \omega - \sin \omega = \frac{\alpha \cos \omega - 1}{\sin \omega}, \quad (5)$$

表述了 2 个台站的水平分量比值 α 依赖于 2 个台站的纬度差 ω 的函数关系, 当我们固定一个台站 φ_j , 另外一个台站纬度不断地调整, 会发现 α 随 ω 单调变化, 当纬度差变动到某一 ω_m 时, α 为最大, 此刻变动台站所处位置即为环电流在地面的投影纬度(图 4), 满足极值条件.

$$\alpha(\omega_m) \cos(\omega_m) - 1 = 0, \quad (6)$$

$$\delta_{\text{proj_lat}} = \varphi_j + \omega_m. \quad (7)$$

通常计算得到的斜率近似等于真值 $A_{ij} \approx \alpha_{\text{true}} = \alpha(\omega_{ij}, \delta_{\text{true}})$ 等号当所有误差全部被消除后成立. 当然我们可以用 2 个台站的实测斜率值代入 α 定义式中, 直接计算 δ , 但为了得到更可靠的结果, 我们用子午台链的一系列台站来计算投影纬度, 它是满足超定约束

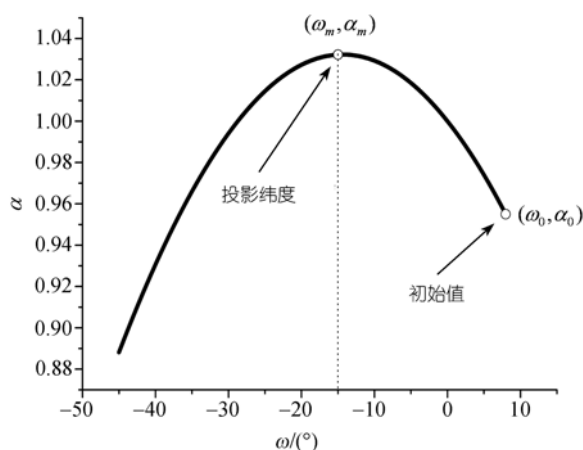


图4 利用参数来计算投影纬度的流程图

$$\text{的最优解: } \min \left\{ \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \left(A_{ij} - \frac{\cos(\varphi_i - \delta)}{\cos(\varphi_j - \delta)} \right)^2 \right\} \quad i \neq j$$

来自同一台链的不同台站. 实际上, 有很多解(一族曲线)满足(5)式, 图4是其中满足上述最小二乘要求的解.

为了统一表述, 我们把投影纬度所记录到的 $\Delta H_{\max}$ 的时间序列记为 $\widetilde{D}_{st}$. 图5列出自2000年后9个强烈磁暴的计算结果, 日期标注在下面中间处. 对于同一个磁暴, 右列代表的是传统的 $\Delta H_k / D_{st}^*$ 与 $\cos \varphi_k$ 线性关系的散点图, 而当我们把倾角考虑进去, 也就是左列 $\Delta H_k / \widetilde{D}_{st}$ 与 $\cos(\varphi_k - \delta)$ 的线性关系散点图, 再进行 $y = A + B \times x$ 拟合时, 发现线性关系有所改进, 并且 $A \approx 0$, $B \approx 1$, 表明明确有一些磁暴期间的赤道环电流偏离了赤道面.

1.5 倾斜角和纬向移动的计算

实际上环电流倾斜或者纬向移动都会使得投影纬度偏离赤道面, 单个台链确定的投影纬度是两种原因共同作用的结果. 为了能够得到倾斜角 δ_t 和纬向移动 δ_s 各自大小, 我们选取了在经度上大致均匀分布的4条子午链, 它们的平均地磁经度为 80° , 200° , 260° , 360° , 需要强调的是: 我们挑取的4个子午台链是以目前用于计算 D_{st} 指数的4个标准台站分别为基础, 进而向南北半球扩展的4个子午链, 尽量使两半球中低纬度台站数目相等.

下面采用通常方法, 即追踪环电流投影纬度在不同经度扇区上的轨迹, 来确定两个参量的各自大小. 假定电流片没有特别严重的弯曲, 只有倾斜参看

图1(b), 理论上如果某一台链监测到最大投影纬度 $+\delta_t$, 相距 180° 经度的台链将记录到 $-\delta_t$, 同时相距 $\pm 90^\circ$ 台链的 $\delta_t \approx 0$. 一般来说, 投影纬度 δ 随经度的变化有如下规律:

$$\tan\{\delta(\theta) - \delta_s\} = \tan \delta_t \sin \theta, \quad (8)$$

其中 θ 代表地磁经度. 一些磁暴事件的计算结果表明4个不同扇区台链记录到的投影纬度, 基本满足关系式(8). 这种检验倾斜和纬向移动的方法, 已被广泛运用于空间物理学研究中如 Heliospheric Current Sheet (HSC) [25], Coronal Streamer 参看 Liewer 等人 [20] 对其公式(1)的描述 [26].

图6列出4个具有代表性磁暴事件的计算结果, 日期标注在每个图的右下方. 拟和曲线来自于(8)式. 图中拟合曲线的水平基线(点线)代表着纬向移动的大小 δ_s , 参看图1(c). 曲线的波峰和谷底如前所述对应着 $+\delta_t$ 和 $-\delta_t$, 指出了倾斜轴所在的地方时扇区. 对于2003年8月18号的磁暴, 环电流没有纬向移动, 只是发生倾斜, 倾斜角约 25° . 在2003年11月20日磁暴期间, 环电流不仅倾斜 21° , 而且向北半球发生整体移动. A~E 5个条形棒表示随着世界时间的延续, 4条子午链所在地方时也跟着发生变化. 其中6(a)对应了倾斜环电流的形态(图1(b)), 6(b)~(d)展现的环电流不仅倾斜, 而且伴有北向移动(图1(c)).

2 讨论

2.1 如何提取环电流倾斜这一特征的信息

环电流通常被划分为对称和非对称(部分环电流)两部分 [27], 构成不同扇区的环电流在强度上有所不同, 造成不同经度台站的 D_{st} 变化略有差异, 因此地磁数据必须来自于同一子午链的一系列台站. 同一经度两个不同纬度台站的磁扰数据之比, 可以便利地保留这环电流在这一扇区空间分布几何特征.

2.2 地磁数据监测环电流的优势

相对于单点或多点的卫星观测, 全世界广泛分布的地磁台网拥有着连续、同时、全球范围监测环电流的有利条件, 尽管倾斜环电流这一简单模型是从地磁角度建立的, 但却很好的符合地面绝大多数的观测, 空间辨识和实时监测环电流及其演化规律对于空间天气研究具有很重要的意义. 更好的了解环电流在空间的分布特征, 恰当地给予定量上的描述不仅对环电流的认识, 而且对 D_{st} 指数改进有所帮助,

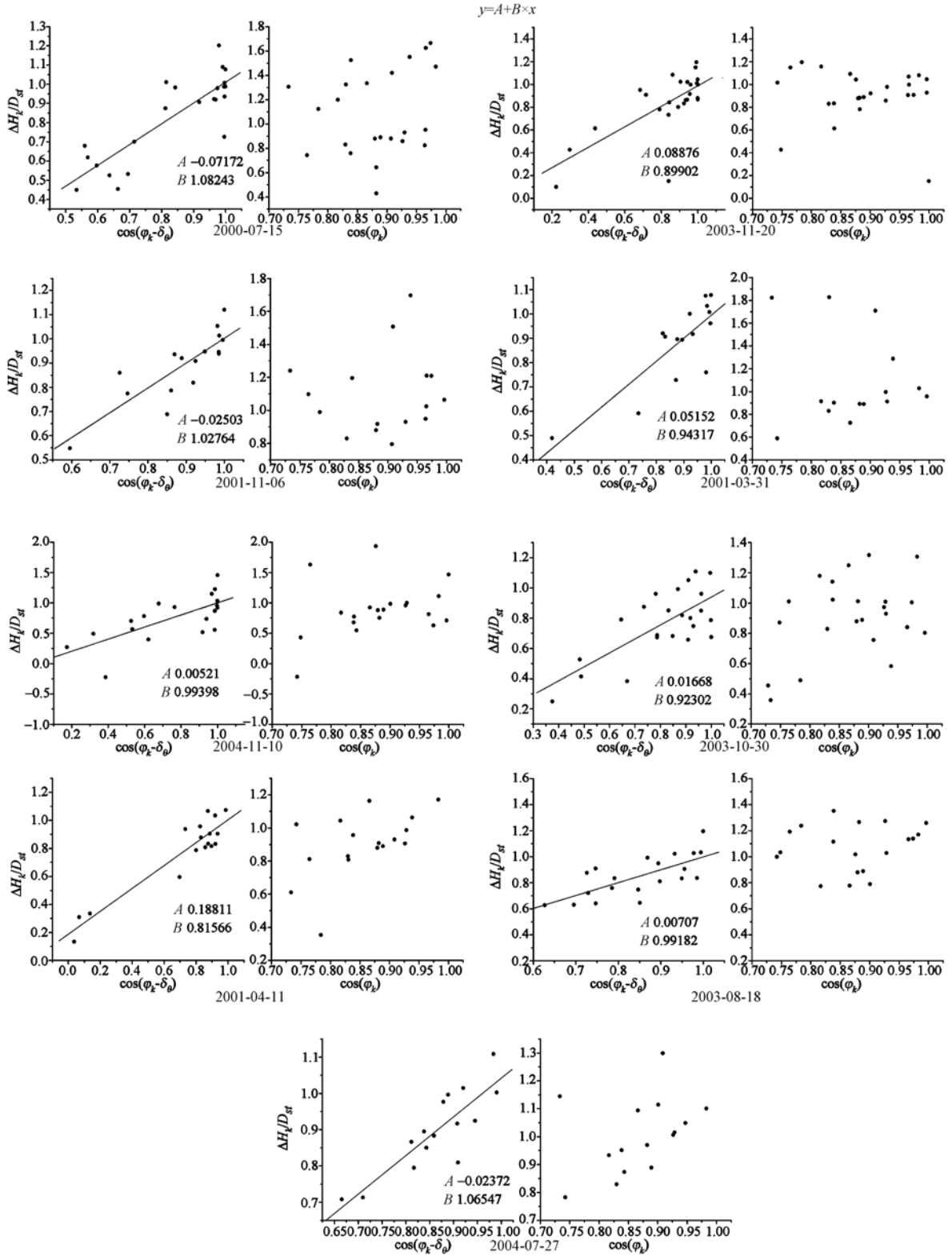


图5 9个不同磁暴事件,不同纬度台站水平分量扰动的相对大小 $\Delta H_k/D_{st}$ 与 φ_k 之间的关系
某次磁暴同样的数据进行了不同的组织,其中左列是考虑了偏斜角,右列没有考虑

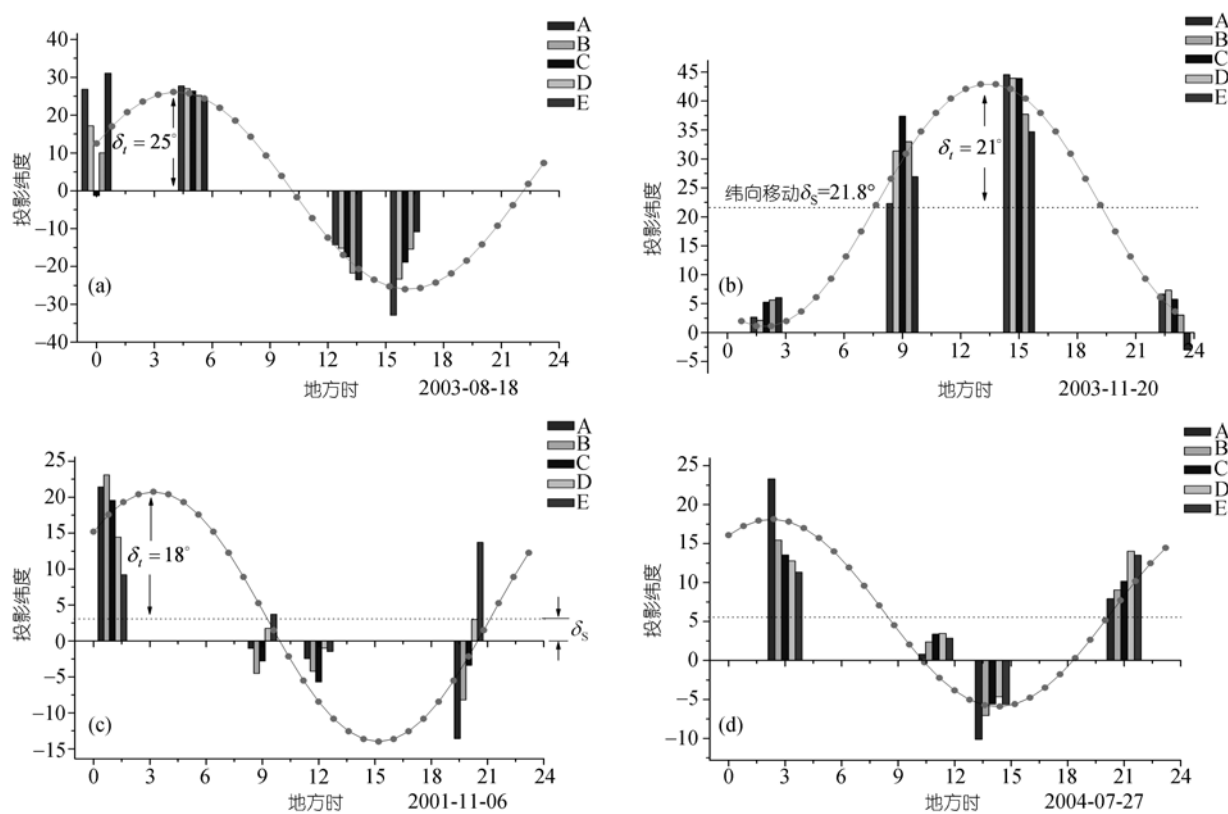


图6 4个不同子午链在不同地方时下记录到的投影纬度, 拟合曲线

来自(8)式, A~E 随着世界时的变化, 台链所在的地方时也在改变. 图中由左至右依次为 A~E

同时也有利于解释不同区域发生的南北半球不对称的现象, 如磁暴期间的热层环流, 电离层纬度异常和磁层磁场位形变化等.

2.3 方法的说明及适用范围

地磁数据是空间各种电流体系综合叠加的结果, 因此设计合理、有效、可靠的参数, 使其很好的保留环电流的几何信息, 降低其他干扰因素的影响, 是为关键.

强磁暴期间的地磁变化主要是由环电流带来的, 当然也要尽量扣除或弱化非环电流的地磁效应: 对于太阳静日变化 S_q , 在强磁暴期间, S_q 对地面磁场带来的影响远小于环电流带来的地磁变化, 并且磁暴期间扰动发电机产生反 S_q 效应, 进一步降低了其影响. 赤道电急流分布在很窄的纬度带内, 在此纬度带外的台站不会受到这种干扰. 感应场作为内源场可以通过球谐分析的方法与外源场分离^[28]. 我们发现内源场基本比例于外源场, 消除感应场后对水平分量相对比值 α 参数的改变不大. 同时大地电导率

对地磁垂直分量 Z 的影响较大, 这使得推算投影纬度最好借助于水平分量的 α 和方程(5)~(7). 目前我们只能给出强磁暴期间环电流的空间位形结构, 这是由于这种情形下参量 α 的计算较为合理, 可以有效地提取出环电流的几何特征.

2.4 环电流倾斜的物理解释

本文依据地面观测的地磁数据来反演环电流的空间分布特征, 需要说明的是: 由地磁观测推算出的环电流是个等效的环电流系统, 它表征的是对 D_{st} 有重要贡献的几个大尺度电流体系的综合效应. 当地磁轴不再垂直日地连线, 磁赤道面与黄道面错开时, 磁层位形将会受到来自太阳风的影响. 尤其是磁尾区域, 太阳风会拖曳磁尾磁场偏离原来所在的磁赤道面, 整体发生弯曲^[29,30]并向黄道面靠拢(参见Cliver等人^[24], 图5)此刻位于磁尾的等离子体中性片也跟着偏离赤道面. 另外Turner^[20]指出大磁暴期间越尾电流对于 D_{st} 的影响不容忽视, 可能达到30%以上, 较强的越尾电流(一般认为沿等离子体中性片),

与传统意义上关于磁赤道面对称的环电流的综合结果,则可以产生类似的地面观测现象.

3 总结

通常情况下,环电流基本位于磁赤道面上,但我们发现在某些强磁暴期间,环电流偏离了赤道面,使得全球的磁场扰动分布规律发生了改变,一些中低纬

度台站的水平分量扰动加强.我们借助比值参数,从地磁数据中提取了环电流的空间分布特征,结果如下:赤道环电流在某些强磁暴期间发生倾斜,倾斜轴大致在正午子夜子午面内,倾斜角基本在 $13^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 范围,其中近一半的事件伴有纬向移动现象,一般不超过 10° ,目前只发现唯一一次事件纬向移动较大接近 21° .

致谢 感谢审稿人对本文讨论部分给予的帮助.

参考文献

- Williams D J. Dynamics of the Earth's ring current: Theory and observations. *Space Sci Rev*, 1985, 42: 375—396[DOI]
- Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. What is a geomagnetic storm? *J Geophys Res*, 1994, 99: 5771—5792[DOI]
- Campbell W H. Geomagnetic storms, the Dst ring-current myth and lognormal distribution. *J Atmos Terr Phys*, 1996, 58: 1171—1187[DOI]
- 徐文耀. 地磁学. 北京: 地震出版社, 2003
- 傅绥燕, 宗秋刚, 濮祖荫, 等. 地磁活动与太阳活动对环电流离子成分与位置的影响. *地球物理学报*, 2003, 46(6): 725—730
- 谢伦, 濮祖荫, 周煦之, 等. 磁暴环电流形成过程. *科学通报*, 2004, 49(6): 603—610
- Le G, Russell C T, Takahashi K. Morphology of the ring current derived from magnetic field observations. *Ann Geophys*, 2004, 22: 1267—1295
- Jorgensen A M, Spence H E, Hughes W J, et al. A statistical study of the global structure of the ring current. *J Geophys Res*, 2004, 109, A05203, doi: 10.1029/2003JA010090
- Daglis I A, Thorne R M, Baumjohann W, et al. The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. *Rev Geophys*, 1999, 37(4): 407—438, 10.1029/1999RG900009
- Turner N E, Baker D N, Pulkkinen T I, et al. Energy content in the storm time ring current. *J Geophys Res*, 2001, 106: 19149—19156[DOI]
- Jordanova V K, Kozyra J U, Khazanov G V, et al. A bounce-averaged kinetic model of the ring current ion population. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 2785[DOI]
- Northrop T G. The Adiabatic Motion of Charged Particles. New York: Wiley Interscience, 1963
- Liemohn M W, Kozyra J U, Clauer C R, et al. Adiabatic energization in the ring current and its relation to other source and loss terms. *J Geophys Res*, 2002, 107, A4: 1045, doi: 10.1029/2001JA000243[DOI]
- Akasofu S I. The main phase of magnetic storms and the ring current. *Space Sci Rev*, 1963, 2, 1, July
- Dessler A J, Parker E N. Hydromagnetic theory of geomagnetic storms. *J Geophys Res*, 1959, 24: 2239—2252
- Scopke N. A general relation between the energy of trapped particles and the disturbance field near the Earth. *J Geophys Res*, 1966, 71: 3125—3130
- 曹晋滨, 燕春晓, 刘振兴, 等. 磁壳参数 L 与磁暴 D_{st} 指数和行星际条件的关系. *空间科学学报*, 2004, 24(2): 89—95
- 徐文耀. 内磁层电流体系的地磁效应. *地球物理学报*, 1992, 35(1): 1—8
- 陈鸿飞, 徐文耀. 1998 年 5 月磁暴磁层电流体系的地磁效应分析. *地球物理学报*, 2001, 44(4): 490—499
- Turner N E, Baker D N, Pulkkinen T, et al. Evaluation of the tail current contribution to D_{st} . *J Geophys Res*, 2000, 105: 5431—5439[DOI]
- Malin S R C, Isikara A M. Annual variation of the geomagnetic field. *Geophys J R Astron Soc*, 1976, 47: 445
- Mayaud P N. Comment on “Semiannual variation of geomagnetic activity” by Russell C T and McPherron R L. *J Geophys Res*, 1974, 79: 1131
- Mayaud P N. The annual and daily variations of the D_{st} index. *Geophys J R Astron Soc*, 1978, 55: 193—201
- Cliver E W, Kamide Y, Ling A G, et al. Semiannual variation of the geomagnetic D_{st} index: Evidence for a dominant nonstorm component. *J Geophys Res*, 2001, 106, (A10): 21297—21304, 10.1029/2000JA000358[DOI]
- Mursula K, Hiltula T. Bashful ballerina: Southward shifted heliospheric current sheet. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(22): 2135, doi: 10.1029/2003GL018201[DOI]
- Liewer P C, Hall J R, et al. Determination of three-dimensional structure of coronal streamers and relationship to the solar magnetic field. *J Geophys Res*, 2001, 106(A8): 15903—15916[DOI]
- Liemohn M W, Kozyra J U, Thomsen M F, et al. Dominant role of the asymmetric ring current in producing the storm time D_{st}^* . *J Geophys Res*, 2001, 106: 10883—10904[DOI]
- Häkkinen L V T, Pulkkinen T I, Nevanlinna H, et al. Effects of induced currents on D_{st} and on magnetic variations at midlatitude stations. *J Geophys Res*, 2002, 107(A1): 1014, doi: 10.1029/2001JA900130[DOI]
- Tsyganenko N A. Magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planet Space Sci*, 1989, 37: 5—20[DOI]
- Tsyganenko N A, Singer H J, Kasper J C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? *J Geophys Res*, 2003, 108(A5): 1209, doi: 10.1029/2002JA 009808[DOI]