

徐文耀, 杜爱民. 磁暴环电流衰减率对磁层能量状态的影响. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1247~1255, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.001

Xu W Y, Du A M. Effects of the ring current decay rate on the energy state of the magnetosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6): 1247~1255, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.001

磁暴环电流衰减率对磁层能量状态的影响

徐文耀, 杜爱民

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 赤道环电流是引起磁暴扰动的主要电流体系, 环电流衰减速率极大地影响着磁层能量收支估计和磁暴预报. 本文提出评价环电流衰减率的两条新指标: (1) E 指标(磁暴事件总能量收支平衡指标), 即磁暴全过程的积分能量收支平衡; (2) L 指标(长期总能量收支平衡指标), 即几年、十几年或更长时段内积分能量收支平衡. 我们用 1998~2003 年 44 个磁暴事件以及第 23 太阳周(1998~2008 年)11 年的连续资料, 分别检验了几类衰减率模型对上述两条指标符合的情况. 结果表明, PA1978 和 XD2010 两类模型对 E 指标符合得最好, 即无论磁暴强弱, 它们均显示出事件总能量收支平衡的基本特征; 同时, 这两类模型与 L 指标符合得也最好, 即它们的长期积分能量基本平衡, 而且磁暴期间的能量消耗表现出明显增强的重要特征.

关键词 环电流, 衰减率, 磁层能量收支, 太阳风-磁层耦合, ϵ 函数

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.001

中图分类号 P353

收稿日期 2009-12-30, 2010-05-17 收修定稿

Effects of the ring current decay rate on the energy state of the magnetosphere

XU Wen-Yao, DU Ai-Min

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Geomagnetic storms are mainly resulted from the ring current, the decay rate of which is one of the key parameters for estimating energy budget of the magnetosphere and for storm prediction. Two new criterions are proposed in this paper for evaluating the decay rate: (1) the E-criterion: the total energy balance for a storm event, or balance between the integrated energy input and output during whole course of the event; (2) the L-criterion: the total energy balance for a long interval, or balance between the integrated energy input and output for a long interval. Several models of decay rate are examined by using 44 selected storms during 1998~2003 and an 11-year-long continuous record for the 23rd solar cycle (1998~2008). The results show that the models PA1978 and XD2010 show fairly well energy balance for all the storm events, satisfying the E-criterion. In addition, the two models fairly well satisfy the L-criterion, exhibiting enhanced energy dissipation during major storm events and long-term energy balance.

Keywords Ring current, Decay rate, Magnetosphere energy budget, Solar wind-magnetosphere coupling, ϵ function

基金项目 国家自然科学基金项目(40874089)资助.

作者简介 徐文耀, 男, 1944 年生, 1966 年毕业于西安交通大学数理系, 1983 年于中国科学院地球物理研究所获理学博士学位. 从事地磁与空间物理研究. E-mail: wyxu@mail.iggcas.ac.cn

1 引言

太阳风的动能和电磁能随太阳风等离子体流动传输到地球磁层,通过磁重联和似黏滞相互作用进入磁层.一部分能量以极光粒子沉降和焦耳加热的方式消耗在极区电离层,产生极光、亚暴和电离层加热,一部分注入赤道环电流,引起磁暴活动,其余部分流向磁尾或返回下游太阳风^[1].

关于环电流形成的物理机制已有相当多的研究^[2].环电流的能量是由(2~10) R_E (R_E 为地球半径)范围内被地磁场捕获的能量离子和电子(10~200 keV)所携带的^[3].卫星观测和数值模拟显示,环电流的时间演化决定于能量注入引起的电流增强和自然衰减引起的电流减弱两种相反的物理过程.因此,赤道环电流的衰减率(或环电流粒子的寿命)是估计太阳风-磁层耦合中能量收支的关键参数之一,也是预报环电流和磁暴强度的重要参数之一.环电流衰减率决定于离子损失的快慢,引起环电流离子损失的物理过程至少有四种:电荷交换、库仑碰撞、波粒相互作用以及漂移损失^[4],这四种过程在磁暴的不同阶段起着不同的作用.卫星观测和数值模拟显示,环电流离子与地冕中性原子的电荷交换是环电流衰减的主要机制^[5~7];而环电流热离子与等离子体层冷电子发生库仑碰撞,其寿命与环电流微分数密度极大值附近的能量的电荷交换寿命差不多^[8];电磁离子回旋波引起环电流离子投射角散射,并在高层大气沉降,使强磁暴和大磁暴主相期间环电流能量损失的时间尺度可以达到很小的值(0.5~1.0 h),远快于电荷交换和库仑碰撞过程所对应的能量损失^[9];在磁暴恢复相前期,环电流离子因流出向日面磁层顶而损失可能是环电流衰减的主要原因^[10,11].

环电流衰减率还依赖于它的粒子成分.观测表明,氧离子 O^+ 对环电流有重要贡献,尤其是当地磁活动性增强时它的贡献更大,在大磁暴期间它甚至起着决定性作用^[5,6,7,12].这些氧离子由电离层上行而来,继而对流到磁层,最终在随后的强亚暴期间注入环电流.大部分 O^+ 成分由于其快速损失而引起环电流的迅速衰减.

在太阳风-磁层耦合的能量收支研究中,估计环电流的能量注入和能量消耗是极其重要的课题,自 Burton 以来^[13],对此已经做了大量的工作^[14].根据环电流能量与地磁扰动强度之间的 Dessler-Parker-

Sckopke 关系 $Dst^*/B_0 = 2E_r/3E_m$, Burton 等人在 1975 年最早提出环电流能量方程^[13]:

$$\partial Dst^*/\partial t = Q - Dst^*/\tau_r, \quad (1)$$

式中 Dst^* 是经过太阳风动压改正后的环电流指数, Q 表示能量注入环电流的速率, τ_r 是环电流衰减的时间常数(即环电流衰减率,或环电流粒子寿命).

Dst 指数需按公式 $Dst^* = Dst - b\sqrt{P} + c$ 进行压力改正,式中太阳风压力 P 是太阳风速度 V 和质量密度 ρ 的函数: $P = \rho V^2$, 常数 b 表示压力改正的比例系数, c 表示静日磁层顶电流和静日环电流对 Dst^* 的贡献^[9],它们可由太阳风观测资料确定.本文使用 $b = 15.8 \text{ nT}/\sqrt{\text{nPa}}$, $c = 20 \text{ nT}$. O'Brien 和 McPherron 根据不同的时间和资料,得到了不同的常数^[15,16]: $b = 7.26 \text{ nT}/\sqrt{\text{nPa}}$, $c = 11 \text{ nT}$.

环电流能量注入率函数 Q 多种多样. Burton 等^[13]用 GSM 坐标系中行星际电场(IEF)的 y 分量 VB_s 表示注入率 ($VB_s < 0$ 时令 $Q = 0$), 得到 $Q = -4.4(VB_s - 0.49) [\text{nT/s}]$. Ballatore 和 Gonzalez^[17]用重联电场 $E_m = VB_i \sin^2(\theta/2)$ 来表示注入率 Q , 式中,横向磁场 B_i 是行星际磁场(IMF)在 GSM 坐标系 $Y-Z$ 平面的投影, θ 是 IMF 的钟表角(即 B_i 与 GSM 系 z 轴的夹角).而 Perreault 和 Akasofu^[18]在处理注入率时,考虑了太阳风对磁层的能量输入率 $\dot{E}_{in}(t)$ 与磁层-电离层系统中能量消耗率 $\dot{U}_{total}(t)$ 之间的平衡关系:

$$\dot{E}_{in}(t) = \dot{U}_{total}(t + \tau_{lag}), \quad (2)$$

式中 τ_{lag} 是磁层对太阳风能量输入的滞后时间,通常取 1 h.

使用最普遍的太阳风能量输入率公式是 Perreault-Akasofu 的 ϵ 函数^[18]

$$\dot{E}_{in} \equiv \epsilon = VB^2 I_0^2 \sin^4(\theta/2), \quad (3)$$

式中 B 是 IMF 的强度, $I_0^2 (I_0 = 7R_E)$ 表示太阳风向磁层传输能量的有效面积.

磁层-电离层系统总的能量消耗包括环电流消耗和极区电离层消耗,

$$\dot{U}_{total} = \dot{U}_{ring} + \dot{U}_{polar}, \quad (4)$$

式中

$$\dot{U}_{ring} = -4 \times 10^4 (\partial Dst^*/\partial t + Dst^*/\tau_r) [\text{GW}], \quad (5)$$

$$\dot{U}_{polar} = 0.3AE [\text{GW}], \quad (6)$$

这里 $1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}$. 极区电离层消耗包括极光粒子沉降和焦耳加热两部分, Perreault 和 Akasofu 假定后者为前者的 2 倍^[18].后来用卫星观测资料得到的

结果与此基本相符^[19].

我们注意到,上述太阳风-磁层能量关系涉及到两个时间参数,一个是描述环电流衰减率的时间参数 τ_r ,另一个是反映磁层-电离层系统对太阳风能量输入响应的滞后时间 τ_{lag} . 其中,衰减率 τ_r 尤其关键,它极大地影响环电流能量计算,特别是在磁暴主相和恢复相前期,因为此时 Dst^* 很大而 τ_r 很小,方程(5)中第二项往往起主导作用. 对此我们可以做一个粗略的估计:假设主相从 $Dst^* = 0$ nT 变化到极大值 $|Dst_{max}^*| \approx 100$ nT 持续了 3 h,主相期间 $\tau_r = 1$ h,则(5)式第二项约为第一项的 3 倍.

对环电流的衰减特性从理论探讨和观测统计两方面进行了大量深入的研究,产生了许多估计环电流衰减的模型^[14]. 最简单的模型是“单值衰减率”,即对于所有的 Dst ,衰减率不变,例如在 Burton 模型中, $\tau_r = 7.7$ h^[13]. 事实上,衰减率随磁暴活动强度而改变. Cummings^[20] 认为这是由于环电流的非对称部分衰减较快,而对称部分衰减较慢的缘故. 现在我们知道,环电流的快速衰减是由于 O^+ 通过电荷交换而快速损失造成的,而缓慢衰减则是 H^+ 通过电荷交换缓慢损失的结果^[6,7,12]. 对此还有另外一种解释:由于地冕密度由内向外逐渐减小,所以环电流的近地部分衰减快而远地部分衰减慢. 所以,应该考虑环电流衰减率的变化. 变化衰减率模型有两类,一类表示为分级离散值,另一类表示为连续函数. 衰减率函数的自变量有的用 Dst 指数,有的用 ϵ ,有的用行星际电场 VB_s ,有的用赤道重联电场.

Akasofu 等人发现,环电流衰减率在 $Dst = 50$ nT 附近有一个突变^[21], Davis 和 Parthasarathy 也注意到这个现象^[22]. 据此,Perreault 和 Akasofu^[18] 提出了一个“两级衰减率”模型:当太阳风能量输入率 $\epsilon < 500$ GW 时 $\tau_r = 20$ h,当 $\epsilon > 500$ GW, $\tau_r = 1$ h. Gonzalez 等使用了较细致的“三级衰减率”^[9]:当 $Dst > -50$ nT、 $-50 > Dst > -120$ nT 和 $Dst < -120$ nT 时衰减率分别等于 4 h、0.5 h 和 0.25 h. 后来,为了研究极强磁暴, Gonzalez 采用了更细的“五级衰减率”^[23]. 根据大量磁暴的研究结果, Akasofu 还提出了“六级衰减率”的设想^[24].

由分级模型很自然地过渡到连续函数模型. O'Brien 和 McPherron 用相空间分析技术,得到了一个以行星际电场 VB_s 作为自变量的环电流衰减率连续函数模型^[24]: $\tau_r = 2.4 \exp\{9.74 / (4.69 + VB_s [\text{mV/m}])\}$. Ballatore 和 Gonzalez^[17] 以赤道重联电场 $E_m = VB_s \sin^2(\theta/2)$ 作自变量,得到 $\lg(\tau_r [\text{h}]) =$

$-0.085E_m [\text{mV/m}] + 2.75$. 最近, MacMahon 和 Llop-Romero^[25] 考虑了似黏性作用造成的全球阻力损失和其他有关的能量耗散过程,用解析分析方法得到了一个衰减函数 $\tau_r = (\alpha/Dst)^{3/2}$. 根据 Akasofu “六级衰减率”的设想,本文用函数拟合的方法得到 $\tau_r [\text{h}] = 1 / (0.1 + 3.0 \times 10^{-4} \epsilon [\text{GW}])$.

表 1 列出了 9 种典型的衰减率函数,图 1 是其中几个函数的图示. 为了便于比较,我们使用 Akasofu^[24] 给出的经验公式 $|Dst| = 60(\lg \epsilon - 18)^2 + 25$,将有些方案中的自变量 ϵ 转化为 Dst .

表 1 9 种典型的环电流衰减率模型

Table 1 Nine typical models of the ring current decay rate

模型代码	衰减时间 τ_r (h)	参考文献和作者
1 BM1975	7.7	Burton et al., 1975 ^[13]
2 DP1967	5 当 $Dst = -20$ nT 时 7 当 $Dst = -30$ nT 时 10 当 $Dst = -40$ nT 时 24 当 $Dst = -50$ nT 时 10 当 $Dst < -50$ nT 时	Davis and Parthasarathy, 1967 ^[22]
3 PA1978	20 当 $\epsilon < 500$ GW 时 1 当 $\epsilon > 500$ GW 时	Perreault and Akasofu, 1978 ^[18]
4 GT1989	4 当 $Dst \geq -50$ nT 时 0.5 当 $-50 > Dst \geq -120$ nT 时 0.25 当 $Dst < -120$ nT 时	Gonzalez et al., 1989 ^[9]
5 G1993	4 当 $Dst \geq -50$ nT 时 2 当 $-50 > Dst > -100$ nT 时 1 当 $-100 > Dst > -200$ nT 时 0.5 当 $-200 > Dst \geq -300$ nT 时 0.25 当 $Dst < -300$ nT 时	Gonzalez, 1993 ^[23]
6 A1981	20 当 $\epsilon < 100$ GW 时 6 当 $100 < \epsilon < 500$ GW 时 3 当 $500 < \epsilon < 1000$ GW 时 1 当 $1000 < \epsilon < 5000$ GW 时 0.3 当 $5000 < \epsilon < 10000$ GW 时 0.2 当 $\epsilon > 10000$ GW 时	Akasofu, 1981 ^[24]
7 OM2000	$2.4 \exp\{9.74 / (4.69 + VB_s [\text{mV/m}])\}$	O'Brien and McPherron, 2000 ^[16]
8 ML2008	$(\alpha/Dst)^{3/2}$	MacMahon and Llop-Romero, 2008 ^[25]
9 XD2010	$1 / (0.1 + 3.0 \times 10^{-4} \epsilon [\text{GW}])$	本文, 2010

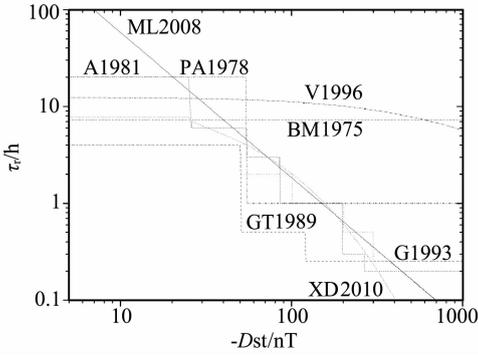


图 1 环电流衰减率 τ_r 的几种方案

Fig. 1 Several schemes of the ring current decay rate τ_r

为了描述太阳风向磁层的能量输入以及磁层-电离层系统中能量的消耗,已经提出了许多能量函数. 检验能量函数的基本准则是能量守恒定律. 根据这一原理,每一瞬时的能量输入值应等于一定时间滞后的输出值,这种指标简单明了,经常被用作能量函数是否合用的指标^[24,26,27],本文称这种检验指标为“瞬时指标”(简称 I 指标).

但是,下面两个因素限制了这种检验的有效性:

(1)磁层对太阳风能量输入的响应有几十分钟到几个小时的滞后,滞后时间随事件和地磁活动状态而变,很难准确确定. 早期的研究多使用小时值数据,常常方便地假定磁层响应滞后 1 h^[18,24,26,27]. 然而,实际情况要复杂得多. 现在我们知道,太阳风注入磁层的能量一般以直接驱动和加卸载两种形式消耗,1 h 的响应滞后近似适用于前者,而不适用于后者. 因为加卸载过程涉及能量在磁尾的逐渐储存和随后的突然释放,它的滞后时间很不确定,不同作者用线性预报滤波等技术估计得到的结果也存在较大分歧^[28~30]. 至于扰动较弱的无暴期间,滞后时间研究得很少. (2)决定太阳风能量进入磁层的是磁层顶重联处的太阳风参数,而不是卫星所在地的实测值,而提供太阳风资料的卫星往往远在拉格朗日点或其他远离磁层顶的地方,太阳风从卫星到磁层顶的传播时间只能大概假设,传播过程中太阳风状态的时空变化常常忽略不计. Petrukovich 等^[32]比较了 1996~1998 三年期间 WIND 和 INTERBALL 卫星的观测资料,发现用不同卫星推测得到的磁层顶太阳风参数往往不同,有 20% 的情况,二者相差 > 15%,对于小亚暴,相差更多.

检验能量耦合函数的另一条常用指标是预报地磁活动性的准确度^[25,33],本文称之为“预报指标”(简称 P 指标). 这种检验所关心的大多是磁暴和亚暴事件,而不是连续的全过程.

本文提出用“磁暴事件总能量平衡(即磁暴全过程的积分能量收支平衡)”和“长期总能量平衡(即几年或更长时段内积分能量收支平衡)”作为评价衰减率的两条新指标,分别称之为“事件指标”(简称 E 指标)和“长期指标”(简称 L 指标). 将能量对时间积分可以最大程度减小磁层响应滞后和太阳风传播的影响. 在第 2 节中,我们首先根据 E 指标,用 1998~2003 年 44 个磁暴事件^[31],对 4 类典型的环电流衰减率模型进行数值检验和比较研究,选出较好的候选模型. 然后在第 3 节,根据 L 指标,对第 23 太阳周(1998~2008 年)的长期能量收支进行数值检验,以便进一步确认候选模型. 第 4 节对能量残差的物理意义以及能量收支不平衡的可能原因进行了讨论.

2 磁暴事件积分能量收支的检验(E 指标检验)

如上所述,为了最大程度减小磁层响应滞后和太阳风传播时间的影响,本文使用 E 指标和 L 指标来检验磁层能量收支平衡.

将(3)、(4)式对时间积分,我们得到给定时间段(t_0, t_1)的能量总输入 E_{in} 和总消耗 U_{total} ,

$$E_{in} = \int_{t_0}^{t_1} \epsilon dt, \quad (7)$$

$$U_{total} = \int_{t_0}^{t_1} \dot{U}_{total} dt, \quad (8)$$

能量收支的不平衡程度可以用“剩余能量”或“能量残差” ΔE 来度量

$$\Delta E = E_{in} - U_{total}, \quad (9)$$

如果有 N 个磁暴事件,可以计算其均方差

$$\sigma = \left[\left(\sum_{i=1}^N \Delta E_i^2 \right) / N \right]^{1/2}, \quad (10)$$

均方差表示该组事件对能量平衡状态的平均偏离情况. 显然, ΔE 和 σ 越小,表明所选的能量函数越好.

要计算积分能量,要求太阳风资料长期而连续. 考虑到这一点,我们选择 1998~2003 年 6 年期间 44 个磁暴作为检验对象,这些磁暴已经经过深入研究,它们的太阳风源也已很好地确定(见文献[31]表 1). 这些磁暴的最小 Dst 值覆盖 -23 nT 到 -566 nT 的宽广范围,包括 8 个弱磁暴 ($(Dst)_{min} > -50$ nT), 11 个中等磁暴 (-50 nT $> (Dst)_{min} > -100$ nT), 17 个强磁暴 (-100 nT $> (Dst)_{min} > -250$ nT) 和 8 个超强磁暴 ($(Dst)_{min} < -250$ nT). 其中有 13 个磁暴(包括 4 个超强磁暴)源于太阳风磁云(MC), 18 个

(包括 4 个超强磁暴)源于复杂抛射(CE),13 个源于高速流(HSS).

对表 1 所列的各种衰减率,用(7)、(8)两式分别计算每个磁暴全过程的能量总输入 E_{in} 和总消耗 U_{total} ,然后由(9)、(10)两式得到 ΔE 和 σ . 图 2 给出 4 类有代表性的衰减率结果,同一类的几个模型结果相近,这里我们只画出其中的一种. 这 4 类衰减率模型是:(1)DP1967,此类还包括 BM1975 模型;(2)OM2000;(3)PA1978,此类还包括 GT1989 模型;(4)XD2010,此类还包括 A1981、G1993 和 ML2008 模型.

图 2 使用了对数坐标,以避免资料点过分密集在 $E_{in}-U_{total}$ 空间的一个小范围内. 由图可以看出:

(1) DP1967 和 OM2000 两类衰减率的标准偏差 σ 较大,分别为 0.183 GGJ 和 0.184 GGJ (1 GGJ = 10^{18} J). 仔细检查发现,这两种衰减率可以很好地描述 HSS 磁暴(三角点所示),但是对于 MC 和 CE 磁暴(方点和圆点),能量总消耗 U_{total} 和能量总输入 E_{in} 相差较大,特别是对于较强磁暴,能量输入明显小于能量消耗.

(2) 与上述两类衰减率相比,PA1978 有明显改善,标准偏差 σ 只有 0.091 GGJ,除了 4 个超强 MC 磁暴和 2 个超强 CE 磁暴外,其与磁暴都有很好的能量平衡.

(3) XD2010 标准偏差最小 ($\sigma = 0.031$ GGJ). 对于大多数磁暴来说,它的结果与 PA1978 相似,但是对于超强磁暴, XD2010 的结果要好得多. 从表 1 和图 1 不难看出其原因: PA1978 的最短衰减时间限于 1 h,对于超强磁暴来说明显偏大,而 XD2010 可以给出 < 0.2 h 的衰减率,从而使超强磁暴的总消耗增大(见公式(6)).

(4) 磁暴强度通常用 $(Dst)_{min}$ (该磁暴的极小 Dst 指数)来表示. 一般来说, $(Dst)_{min}$ 越小(即绝对值越大),磁暴越强,磁暴的能量总输入 E_{in} 或总消耗 U_{total} 也越大,如图 3 所示. 但是二者的相关性并不好. 这是因为决定 E_{in} 和 U_{total} 大小的因素除了磁暴强度外,还有磁暴持续的时间. 弱而长的磁暴总能量不一定小于强而短的磁暴. 由图 3 可以看出,在 8 个超强磁暴中,有 2 个短磁暴能量显著偏低. 概括说来,在所研究的 44 个磁暴中, $(Dst)_{min} > -50$ nT 的弱磁暴能量范围是 0.01~0.06 GGJ, $(Dst)_{min}$ 在 -50 nT 到 -100 nT 之间的中等磁暴能量范围是 0.004~0.1 GGJ, $(Dst)_{min}$ 在 -100 nT 到 -250 nT 之间的强磁暴能量范围是 0.01~0.2 GGJ, $(Dst)_{min}$ 在 -250 nT 以上的超强磁暴能量范围是 0.01~0.8 GGJ.

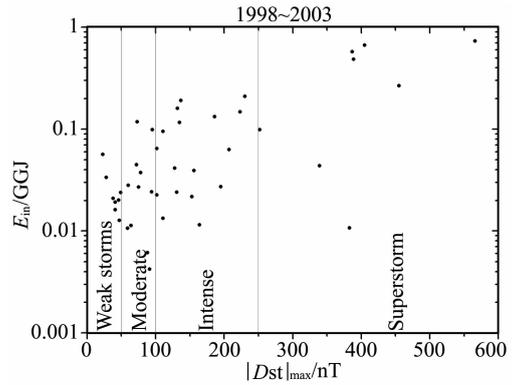


图 3 磁暴的 $(Dst)_{min}$ 与该磁暴全程太阳风能量总输入 E_{in} 的关系

Fig. 3 Relationship between $(Dst)_{min}$ and E_{in} for storms

3 第 23 太阳周磁层积分能量的检验 (L 指标检验)

第 23 太阳周 (SC23) 从 1996 年延续到 2008 年,黑子年峰值 119.6 出现在 2000 年. 由于得不到 1996~1997 两年的 AE 指数,本文只检验 1998~2008 年 11 年期间的总能量平衡情况. 对表 1 中每一种环电流衰减率,用(7)、(8)两式求得太阳风能量的总输入 E_{in} 和磁层-电离层总消耗 U_{total} 随时间的连续变化,同时计算能量残差 $\Delta E(t)$,如图 4 所示. 为了突出能量残差,曲线 $\Delta E(t)$ 填充以颜色.

由图 4 可以看出太阳风-磁层能量耦合有如下特点:

(1) 能量输入的特点: 太阳风能量输入曲线明显地分为两段,前段为 1998~2005 年太阳活动期,包括上升相后期(1998~1999)、极大期(2000 年)和下降相前期(2001~2005),这一段的太阳风能量输入率较大,平均每年输入 5.5 GGJ;第二段为 2006~2008,是黑子周下降相后期,平均每年输入 2 GGJ,约为前一段 40%.

(2) 能量消耗的特点: 磁层-电离层能量消耗曲线大体跟随能量输入曲线而发展,但是 DP1967(图 4a) 和 OM2000(图 4b) 两类衰减率给出的消耗明显小于输入,最终的能量残差分别达到 3.90 GGJ 和 15.80 GGJ. 与此相比,PA1978(图 4c) 的最终残差很小,仅为 2.34 GGJ. 而 XD2010(图 4d) 的最终残差最小,仅为 -1.42 GGJ. 从图 4 还看到,每条残差曲线可以分为两种成分:线性变化 $\Delta E_1(t)$ 和太阳周变化 $\Delta E_2(t)$. $\Delta E_1(t)$ 代表残差能量在磁层中逐渐积

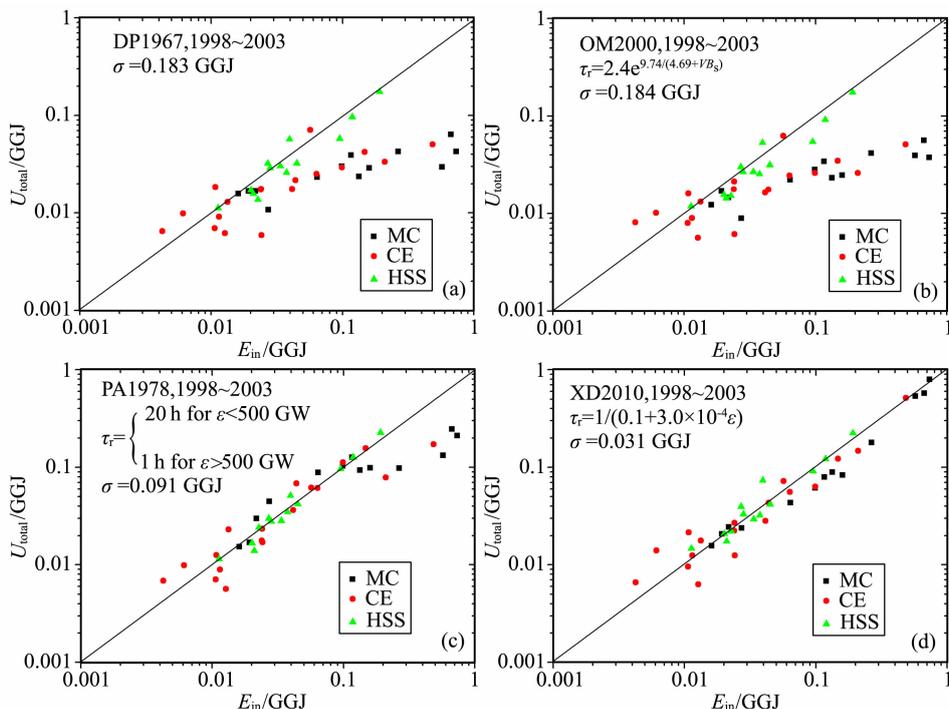


图 2 对 4 类典型环电流衰减率所计算的磁暴输入、输出总能量散点图 $E_{in}-U_{total}$

横坐标表示输入总能量,纵坐标表示输出总能量.每图中的斜直线表示能量平衡线 $E_{in}=U_{total}$.每一种衰减率的方差 σ 指出对能量平衡的偏离.3 种太阳风源(MC、CE 和 HSS)的磁暴分别用黑色方块、红色圆点、绿色三角表示.

Fig. 2 Scatter plots of $E_{in}-U_{total}$ for 44 magnetic storms. Four panels are for 4 groups of the ring current decay rate models. The abscissa is for the total input energy E_{in} , and the ordinate for the total energy dissipation U_{total} . The straight line in each panel represents the energy balance condition $E_{in}=U_{total}$. Deviations from the energy balance are described by the variance σ . Three kinds of solar sources (MC、CE and HSS) are denoted by black squares, red solid circles and green triangles, respectively.

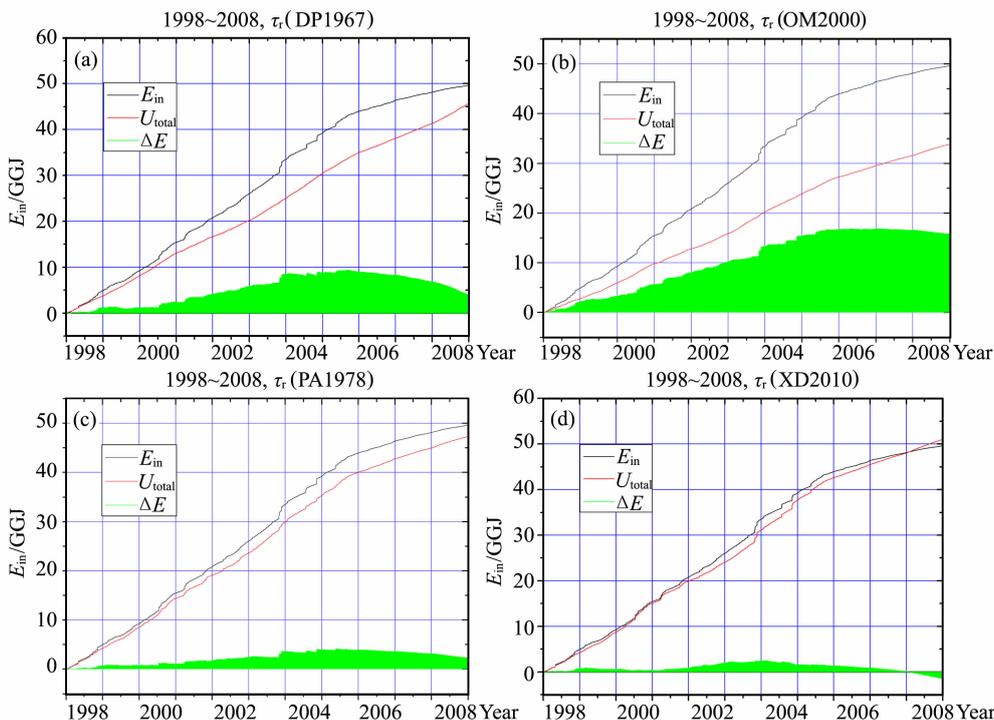


图 4 对不同的环电流衰减率计算得到的第 23 太阳黑子周期期间太阳风能量输入 E_{in} 、磁层-电离层能量消耗 U_{total} 以及能量残差 ΔE (a)DP1967; (b)OM2000; (c)PA1978; (d)XD2010.

Fig. 4 The solar wind energy input E_{in} , energy dissipation U_{total} in the magnetosphere-ionosphere system, and the residual energy ΔE during the 23-th solar cycle, calculated for different models of the ring current decay rate

累,反映了能量消耗函数对输入函数的系统偏差,应该通过改变函数的比例系数加以修正; $\Delta E_2(t)$ 表示积累能量的太阳周调制,简单地修正函数系数不能消除这一残差,它也许反映磁层能量状态的一种特点,详见后面的讨论.

(3)磁暴期间的能量特点:磁暴是磁层能量大量输入和释放的事件,在能量输入曲线上表现为阶梯形的陡增.但是,不同衰减率的能量释放曲线对此却有不同的表现.在主要磁暴期间,PA1978(图 4c)和XD2010(图 4d)能量释放曲线表现出阶梯形的陡增,与输入曲线相当一致,表明它们能够很好反映磁暴能量消耗增大的特征.但是,DP1967(图 4a)和OM2000(图 4b)释放曲线却过分平滑,磁暴时没有出现应有的突增.换言之,这两种衰减率不能很好刻画磁暴能量消耗增大的特征.

5 讨论

5.1 能量残差的物理含义

太阳风-磁层能量耦合研究的中心问题是太阳风能量注入磁层-电离层系统的物理机制以及注入的能量如何在该系统内分配和消耗.本文不具体讨论能量注入和消耗的物理机制,而是从能量守恒的角度,检验已有的各种环电流衰减率模型对能量计算的影响.但我们所用的方法与以往研究不同,以往的研究多注重瞬时能量输入和消耗的关系,即只关注 I 指标.而本文用磁暴事件全过程的积分能量以及整个太阳周的总能量,在能量守恒准则下,考察计算结果,提出了两个新的检验指标: E 指标和 L 指标.

从理论上说,输入磁层的能量应该等于磁层消耗的能量,但是实际计算总有误差,而且大多数能量函数是由观测资料得到的统计关系,不同资料结果相异本在预料之中.能量残差 $\Delta E(t)$ 即反映了这一事实.但是, $\Delta E(t)$ 时间变化的特征引起我们的注意:虽然对不同衰减率得到的线性趋势 $\Delta E_1(t)$ 相差很大,但是 $\Delta E_2(t)$ 的变幅度和相位却大致相近,最大 $\Delta E_2(t)$ 都出现在太阳高年之后下降段的早期(参见图 4).这种太阳周变化可能暗示着能量耦合的效率随太阳周而变,也可能暗示,磁层能量状态随太阳周而变.若为前者,则需要能量耦合函数中引入随太阳周而变化的因子;若为后者,则需要考虑太阳风输入磁层的能量在磁层中长期积累的可能性及其在磁暴亚暴发生过程中的作用.如图 4 所示, $\Delta E_2(t)$

的极大值出现在太阳高年之后下降段的早期,这似乎表明,太阳周的前半周有能量在磁层中逐渐积累,而在后半周这些能量参与释放.这一思想得到下面观测事实的支持:(1)IMF 北向期间,一般来说太阳风输入能量很小,但也有磁暴发生,磁暴的能量消耗往往大于当时的能量输入,多消耗的能量从何而来?(2)在太阳周下降段,当太阳风较为平静而输入能量较小时,也时有磁暴发生,其能量消耗往往大于当时的能量输入,多消耗的能量又是从何而来?一个可能的解释是,太阳活动期预先储存在磁层中的能量在太阳周下降段参与了释放.

由于能量函数存在许多不确定性,无论是太阳风能量输入,还是磁层电离层能量消耗很难准确估计,磁尾加热和等离子体带到远磁尾或返回太阳风的能量更难测量和估算,所以,上述思想的验证有待于更多的观测和进一步研究.

5.2 DP1967 和 OM2000 总能量收支不平衡的原因

DP1967(图 3a 和 4a)和 OM2000(图 3b 和 4b)表现出较严重的能量收支不平衡,其主要表现是大磁暴期间能量消耗不足.这一点从图 3a 和图 3b 看得很清楚:对应大磁暴(特别是 MC 磁暴和 CE 磁暴)的点明显偏离能量平衡直线,落在直线下方.这种能量消耗不足也清楚地表现在图 4a 和图 4b 的能量积累曲线上:磁暴期间能量消耗没有明显的增强,这与能量输入的显著增大不匹配.

由表 1 不难看出,DP1967 收支失衡的原因在于大磁暴期间 τ_r 太大,限制了环电流能耗的增大(见(5)式).OM2000 收支失衡的原因与此类似.由表 1 可以看出,OM2000 模型的 τ_r 是行星际电场 VB_s 的函数, τ_r 虽然随电场增大而减小,但减小速率渐趋缓慢,从而使环电流能耗增加速率变小,不能紧跟能量输入的快速增大.此外, VB_s 函数的半波整流特性也极大地限制了 IMF 北向期间能量收支的正确描述.

5.3 无磁暴期间的能量收支

从图 4 积分能量曲线可以看出,在无磁暴的平静期和弱扰期,能量的输入和消耗对总能量收支也有一定贡献,不可忽略.特别在太阳活动低年,磁暴少而小,平静期很长,能量缓慢长期积累的总量往往可与磁暴期间快速但短暂的积累总量相比拟.过去的研究多关注磁暴与亚暴,看来,平静期的能量特征也是值得研究的.

6 结论

(1)本文提出了两条评价环电流衰减率的新指

标;E 指标(衡量磁暴事件总能量平衡的指标)和 L 指标(衡量长期总能量平衡的指标)。

(2)用 1998~2003 年 44 个磁暴事件资料,对 4 类典型的环电流衰减率模型,计算了每个磁暴期间太阳风能量输入与磁层-电离层能量消耗,探讨了二者之间的关系。结果表明,4 类衰减率模型中只有 PA1978 和 XD2010 两类模型可以给出较好的能量收支平衡,另外两类低估了大磁暴能量消耗。

(3)为了进一步确认上述两个候选模型的有效性,对第 23 太阳周(1998~2008 年)磁层能量收支进行了数值检验。结果表明,PA1978 和 XD2010 两类模型很好地反映了磁暴期间能量消耗明显增强的重要特征,而且长期积分能量基本平衡,残差能量很小,其中 XD2010 的残差最小。其余两类模型的残差能量较大,表明能量收支严重不平衡;而且,它们不能很好刻画磁暴期间能量消耗明显增强这一基本特征。

致 谢 作者感谢美国空间科学数据中心提供的 OMNI 太阳风资料,感谢日本京都世界数据中心(地磁)提供的地磁指数。

参考文献(References)

- [1] Kamide Y, Baumjohann W. Magnetosphere-Ionosphere Coupling. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1993
- [2] Kamide Y, Maltsev Y P. Geomagnetic Storms. In: Kamide Y, Chian A eds. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 355~374
- [3] Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 5771~5792
- [4] Keika K, Nose M, Brandt P C, et al. Contribution of charge exchange loss to the storm time ring current decay: IMAGE/HENA observations. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: A11S12, doi:10.1029/2006JA011789
- [5] Hamilton D C, Gloeckler G, Ipavich F M, et al. Ring current development during the great geomagnetic storm of February 1986. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**:14343~14355
- [6] Daglis I, Thorne R M, Baumjohann W, et al. The terrestrial ring current: origin, formation, and decay. *Rev. Geophys.*, 1999, **37**:407~438
- [7] Daglis I A. The storm-time ring current. *Space Sci. Rev.*, 2001, **98**:343~363
- [8] Fok M C, Kozyra J U, Nagy A F, et al. Decay of equatorial ring current ions and associated aeronomical consequences. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:19381~19393
- [9] Gonzalez W D, Tsurutani B T, Gonzalez A L C, et al. Solar wind-magnetosphere coupling during intense magnetic storms (1978~1979). *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:8835~8851

- [10] Liemohn M W, Kozyra J U, Thomsen M F, et al. Dominant role of the asymmetric ring current in producing the stormtime *Dst*. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A6):10883~10904
- [11] Kozyra J U, Liemohn M W. Ring current energy input and decay. *Space Sci. Rev.*, 2003, **109**: 105~131
- [12] Daglis I A, Kozyra J U, Kamide Y, et al. Intense space storms: critical issues and open disputes. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A5):1208, doi:10.1029/2002JA009722
- [13] Burton R K, McPherron R L, Russell C T. Empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.*, 1975, **80**:4204~4214
- [14] Feldstein Y I. Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters. *Space Sci. Rev.*, 1992, **59**: 83~165
- [15] O'Brien T P, McPherron R L. Forecasting the ring current index *Dst* in real time. *J. Atmos. Solar Terres. Phys.*, 2000, **62**:1295~1299
- [16] O'Brien T P, McPherron R L. An empirical phase space analysis of ring current dynamics: solar wind control of injection and decay. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 7707~7720
- [17] Ballatore P, Gonzalez W D. On the estimates of the ring current injection and decay. *Earth Planets Space*, 2003, **55**: 427~435
- [18] Perreault P, Akasofu S-I. A study of geomagnetic storm. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1978, **54**:547
- [19] Østgaard N, Germany G, Stadsnes J, et al. Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A9):1233, doi:10.1029/2001JA002002
- [20] Cummings W D. Asymmetric ring currents and the low-latitude disturbance daily variation. *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**:4495~4503
- [21] Akasofu S-I, Chapman S, Venkatesan D. The main phase of great magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1963, **68**:3345~3350
- [22] Davis T N, Parthasarathy R. Relationship between polar magnetic activity DP and growth of the geomagnetic ring current. *J. Geophys. Res.*, 1967, **72**:5825~5836
- [23] Gonzalez W D. Ring current evolution during intense magnetic storms. In: Storm/Substorm Relationship Workshop, Breckenridge, Colorado, 1993
- [24] Akasofu S-I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Sci. Rev.*, 1981, **28**:121~190
- [25] MacMahon R M, Llop-Romero C. Ring current decay time model during geomagnetic storms: a simple analytical approach. *Ann. Geophys.*, 2008, **26**:2543~2550
- [26] 徐文耀,师恩琦. Akasofu 能量耦合函数的数值检验. 空间科学学报, 1986, **6**(1):24~32
- Xu W Y, Shi E Q. Numerical examination of Akasofu's energy coupling function. *Chinese J. Space Sci.* (in

- Chinese), 1986, **6**(1):24~32
- [27] 陆文松,徐文耀. 行星际磁场北向时太阳风-磁层的能量耦合. *地球物理学报*,1996, **39**(5):577~587
Lu W S, Xu W Y. On solar wind-magnetosphere energy coupling during northward IMF. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(5):577~587
- [28] Bargatze L F, Baker D N, McPherron R L, et al. Magnetospheric impulse response for many levels of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(A7): 6387~6394
- [29] Iyemori T, Maeda H, Kamei T. Impulse response of geomagnetic indices to interplanetary magnetic field. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1979, **31**:1
- [30] Clauer C R. The technique of linear prediction filters applied to studies of solar wind-magnetosphere coupling. In: Kamide Y, Slavin J A eds. *Solar Wind-Magnetosphere Coupling*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1986. 39~57
- [31] Lu G. High-speed streams, coronal mass ejections, and interplanetary shocks: a comparative study of geoeffectiveness. In: Tsurutani B, McPherron R, Gonzalez W eds. *Recurrent Magnetic Storms; Cototating Solar Wind Streams*. Washington D C: AGU, 2006
- [32] Petrukovich A A, Kallio E I, Pulkkinen T I, et al. Solar wind energy input and magnetospheric substorm activity. *Proceedings of 5th International Conference on Substorm*, 2000. 63~70
- [33] Siscoe G, McPherron R L, Liemohn M W, et al. Reconciling prediction algorithms for *Dst*. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**:A02215, doi:10.1029/2004JA010465

(本文编辑 何 燕)