0254-6124/2011/31(1)-001–14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Xu Wenyao. Energy budget in the coupling processes of the solar wind, magnetosphere and ionosphere. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(1): 1-14

太阳风–磁层–电离层耦合过程中的能量收支 *

徐文耀

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘 要 太阳风向磁层–电离层 (Magnetosphere and Ionosphere, MI) 系统输入能量, 而输入的能量随后在 MI 系统中消耗. 本文从能量守恒原理出发, 讨论太阳风–磁层–电离层 (SMI) 耦合过程中的能流路径和能量收支的定量关系. 主要讨论 9 个问题: (1) 太阳风向 MI 系统的能量输入, (2) MI 系统对能量输入的响应, (3) 环电流的能量消耗, (4) 极区电离层焦耳加热的能量消耗, (5) 极光粒子沉降的能量消耗, (6) 磁尾能量的消耗、储存以及返回下游太阳风, (7) 平静期间的能量积累与释放, (8) 能量在不同能汇中的分配, (9) 评价能量函数的准则和方法.

关键词 太阳风–磁层–电离层耦合 (SMI 耦合), 磁层–电离层系统 (MI 系统), 能量收支, 耦合函数, 环电流, 焦耳加热, 极光粒子沉降

中图法分类号 P 3

Energy Budget in the Coupling Processes of the Solar Wind, Magnetosphere and Ionosphere

XU Wenyao

(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

Abstract On the basis of the principle of energy conservation, this paper reviews the aspects on energy input and dissipation in the coupling processes of the Solar wind, Magnetosphere and Ionosphere (SMI coupling). We focus on the following 9 principle issues: (1) solar wind energy input, (2) magnetosphere response to solar wind energy injection, (3) ring current dissipation, (4) Joule heating in the polar ionosphere, (5) auroral particle precipitation, (6) energy dissipation and storage in the magnetotail, and energy returning from the magnetosphere to solar wind, (7) energy accumulation and dissipation during quiet periods, (8) energy partitioning in different sinks, (9) the criterions and methods for assessing energy function.

Key words Solar wind-Magnetosphere-Ionosphere (SMI) coupling, Magmetosphere-Ionosphere (MI) system, Energy budget, Coupling function, Ring current, Joule heating, Auroral particle precipitation

---

* 国家自然科学基金项目资助 (40874089)

2010-08-21 收到原稿, 2010-11-01 收到修定稿

E-mail: wyxu@mail.igcas.ac.cn

1 引言

光辐射和太阳风等离子体流是太阳向地球输送能量的两种主要方式. 由太阳常数 ($1370\,\mathrm{W/m^2}$) 和地球截面 πR_e^2(地球半径 $R_\mathrm{e}=6372\,\mathrm{km}$), 可以算出太阳光辐射能流约为 $1.75\times10^{17}\,\mathrm{W}$. 另外, 由典型的太阳风条件 ($n=5\,\mathrm{cm^{-3}}$, $v_\mathrm{sw}=400\,\mathrm{km/s}$) 和地球磁层迎着太阳风的截面积 (向日面磁层顶迎风截面积约为 $\pi\,(15\,R_\mathrm{e})^2$, 磁尾渐大的截面约为 $\pi\,(30\,R_\mathrm{e})^2$) 可以估计太阳风动能流约为 $1\sim5\times10^{13}\mathrm{W}$. 在 1 AU 附近, 太阳风速度 v_sw 远大于阿尔芬速度 ($v_\mathrm{A}\approx50\,\mathrm{km/s}$), 典型的阿尔芬马赫数 M_A 约为 $8\sim10$, 由此可知, 太阳风的动能流约比磁能流大二个数量级 [1−2].

虽然太阳风能流只有光辐射能流的万分之一, 但是, 不能由此得出 “太阳风不重要” 的结论. 对一个能量过程而言, 还应该看输入的能量所作用的对象. 光辐射能流虽然很强, 但是它作用的对象是质量巨大的大气层、水圈和固体地球, 三者的质量分别为 $5.136\times10^{18}\,\mathrm{kg}$, $1.66\times10^{21}\,\mathrm{kg}$, $5.976\times10^{24}\,\mathrm{kg}$. 太阳风能流虽然较弱, 但它所作用的磁层–电离层系统总质量不到大气层的十万分之一; 它所作用的另一个对象 —— 地磁场也很弱, 其地表以外总能量仅为 $8.4\times10^{17}\,\mathrm{J}$, 约等于一天内冲击到地球磁层向日侧迎风面上的太阳风总能量. 由此不难推断, 如果说太阳光辐射决定着地球大气圈–水圈系统的扰动, 那么, 太阳风则决定着磁层–电离层系统的扰动, 后者的剧烈程度也许比前者更强.

冲击到地球磁层顶的太阳风能流 (记作 $\dot{P}_\mathrm{sw}$), 绝大部分绕过磁层顶流向下游, 只有 1%∼5% 的能量 (记作 $\dot{E}_\mathrm{in}$) 通过磁场重联和似粘滞作用进入磁层. 在平静条件下, $\dot{E}_\mathrm{in}\approx200\,\mathrm{GW}$, 在强扰动期间, $\dot{E}_\mathrm{in}\approx800\,\mathrm{GW}$[1−6]. 进入磁层–电离层 (MI) 系统中的太阳风能量, 一部分从远磁尾返回太阳风, 其余大部分消耗在 MI 系统内, 引起磁层空间暴和亚暴等一系列扰动现象 [7].

半个世纪以来, 地面观测和空间卫星探测不断揭示出地球空间环境的未知结构和未知现象, 理论研究、数值模拟、磁层建模以及 KRM, AMIE 等各种资料处理反演技术的应用不断加深着人们对地球空间过程的认识, 而太阳风–磁层–电离层 (SMI) 耦合则一直是研究的热点之一, 其中, 能量和粒子的输运更为人们所关注 [1−2,6,8−26].

进入磁层的能量主要以 “随到随放” 的直接驱动过程和 “先储后放” 的加载–卸载过程两种方式流向 MI 系统的三个区域: 环电流区、极区电离层区及磁尾区. 粗略估计, 三个区域的能量分配各占 1/3[2]. 在进入环电流的能量中, 有一部分经由部分环电流–场向电流–电离层电流构成的回路, 输运到极区电离层, 最终在那里消耗掉; 而其余能量通过电荷交换、库伦碰撞、波粒相互作用以及漂移损失等过程消耗掉 (记作 $\dot{U}_\mathrm{r}$), 其中, 环电流离子与地冕中性原子的电荷交换是环电流能量消耗的主要机制 [27−30]. 由极隙区、磁尾和部分环电流三条途径进入极区的能量主要消耗于电离层–热层焦耳加热 $\dot{U}_\mathrm{J}$ 及极光粒子沉降 $\dot{U}_\mathrm{a}$, 二者之和记为 $\dot{U}_\mathrm{p}$. 进入磁尾的能量一部分消耗于磁尾加热 (记作 $\dot{U}_\mathrm{t}$), 一部分由磁尾重联生成的等离子体团 (磁岛) 携带到远磁尾, 返回下游太阳风 ($\dot{E}_\mathrm{out}$), 也可能有一部分驻留在磁尾, 并参与以后的磁层能量过程 (见后面的讨论). 图 1 为上述 SMI 耦合的能流图 [2].

能量守恒是一切系统和一切过程必须遵循的原理, 它在 SMI 耦合中的表现形式就是 MI 系统能量收支必须平衡, 即太阳风输入 MI 系统的净能量必须等于 MI 系统消耗的能量. 如果不考虑 MI 系统的储能过程, MI 系统由太阳风得到的净能量 $\dot{E}_\mathrm{mi}$(即流入能量减去流出能量) 应该等于 MI 系统中消耗的总能量 $\dot{U}_\mathrm{tt}$, 即

$$\dot{E}_\mathrm{mi}(t)=\dot{U}_\mathrm{tt}(t+\tau_\mathrm{lag}). \tag{1}$$

式中,

$$\dot{E}_\mathrm{mi}\equiv\dot{E}_\mathrm{in}-\dot{E}_\mathrm{out}=\alpha\dot{P}_\mathrm{sw}, \tag{2}$$

$$\dot{U}_\mathrm{tt}=\dot{U}_\mathrm{r}+\dot{U}_\mathrm{p}+\dot{U}_\mathrm{t}=\dot{U}_\mathrm{r}+(\dot{U}_\mathrm{a}+\dot{U}_\mathrm{J})+\dot{U}_\mathrm{t}. \tag{3}$$

式中, 系数 α 表示太阳风能量输入 MI 系统的比例, 俗称 SMI 能量耦合率. τ_lag 表示 MI 系统对太阳风响应的滞后时间. 对于不同的太阳风条件及不同的事件和不同的 MI 模型, α 值分散在 0.3%∼6.9% 的范围内 [1,3−6,12,31]. 造成这种分散的原因之一是不同作者使用不同的 “磁层迎风面积”. Pereaullt 和 Akasofu[10], 还有 Knipp 等 [5] 使用 $(7\,R_\mathrm{e})^2$, Shue 等 [32] 建议用 $\pi\,(10\,R_\mathrm{e})^2$, Lu 等 [4] 用 $(15\,R_\mathrm{e})^2$, 大小相差 6 倍之多. 应该指出, 这里的 “迎风面积” 是指太阳风能量输入磁层的 “有效面积”, 而不是太阳风冲击磁层顶的真实面积. 迎风面积大小取决于太阳风压力和行星际磁场 IMF 的 B_z 分量等条件 [6,10,32].

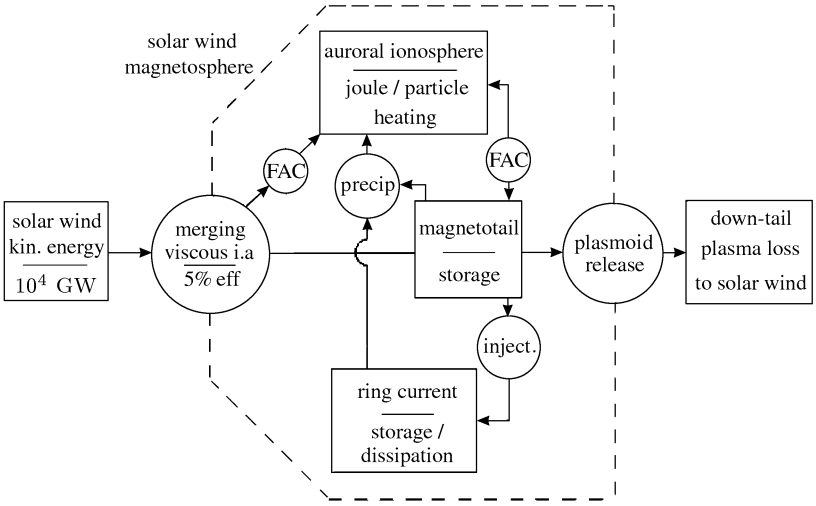


图 1 SMI 耦合过程能流示意图 [2] (虚线内为 MI 系统, 虚线内的方框表示 MI 系统的 3 个区域; 虚线外为行星际太阳风系统, 两个方框表示太阳风的上游和下游; 圆圈表示能流路径)

Fig. 1 Scheme of the energy flow in SMI coupling (Dashed block is the MI system, in which three squares indicate main regions of the system. Solar wind flows outside the dashed block, where two squares represent upstream and downstream solar wind, respectively. Circles show energy flow in the SMI system)

考察 MI 系统能量收支的最大困难之一是缺乏连续而全面的磁尾能量检测资料, 即磁尾加热 $\dot{U}_{\rm t}$ 和返回下游太阳风的能流 $\dot{E}_{\rm out}$ 难以估计. 另外一个困难是当考虑能量储存时, 式 (1) 不再成立. 遗憾的是, 目前我们对磁层能量储存的特点还缺乏了解, 在实际计算时只能做一些简单的假设. 所以, 磁尾能量的动态变化很难确切估计. 迄今为止, 能量消耗的定量估计仅限于环电流和极区电离层–热层.

下面, 分别讨论 SMI 耦合研究中的 9 个主要问题.

2 太阳风向磁层–电离层系统的能量输入

SMI 耦合研究要回答的第一个问题是, 太阳风向磁层–电离层 (MI) 系统的活动性是否源于太阳风变化. 除了一些理论论证外 [33−34], 回答这一物理问题的主要方法是统计相关分析, 其中包括经典的统计方法和自谱、互谱、神经网络、小波、支持向量等技术. 统计相关的一方是太阳风参数, 用以表征太阳风向 MI 系统的能量输入; 另一方是地磁活动指数, 用以表征 MI 系统中的能量消耗. 能量输入和消耗二者的时间滞后反映它们的因果关系和可能的能流路线, 而二者相关性的强弱反映能源和能汇的设想是否正确与全面. 常用的太阳风参数有速度、密度、行星际磁场强度 (或其南向分量) 等, 有时也用几个太阳风参数组合而成的函数, 或简单, 或复杂, 或以能量的形式, 或以行星际电场、能流、磁层顶重联率、开放磁场线生成速率等其他不同的形式 [9,11,13,25,35]. 常用的地磁指数有 Kp, ap, Ap, AE, AL, Dst 等, 有时也用单个指数的某种函数或几个指数的组合函数. 表 1 列出了一些引用较多的结果 [12]. 这些统计研究不仅证实了太阳风变化是 MI 系统活动性的根源这一早期物理推断, 而且总结归纳出了许多形式多样的经验公式. 其中一些已经成功地应用于空间环境监测和空间天气预报. 应该特别强调的是, 用统计方法得到的这些物理量, 无论是描述太阳风的量, 还是描述 MI 系统的量, 一般来说, 还不是真正意义上的能量 (或能流), 而只是代表或刻画能量的 “等效” 物理量 (proxy).

在 SMI 耦合的第一个问题基本解决后, 要回答的第二个问题是, 真正的能量 (或能流) 如何表达. 在诸多统计关系中, 如何构建物理意义明确的 “能量耦合函数”, 用以描述 MI 系统能量收支中的 “输入”. 在早期工作中, 最常见的是 Perreault-Akasofu 的 ε 函数 [10,12]. 后来的检验指出, ε 函数低估了太阳风能量输入, 而且在导出该函数时所用的环电流能耗估计偏高, 焦耳加热能耗估计偏低. 于是, 出现了其他一些

表 1 地磁活动指数与太阳风参数的统计相关性

Table 1 Statistical Correlations between geomagnetic activity indices and solar wind parameters

作者 (年代)	地磁指数或其他物理量 (时间分辨率)	与太阳风参数的关系
Snyder 等 (1963)	$\sum Kp$ (24 h)	$\sum Kp = (v-330)/8.44$
Olbert (1968)	$\sum Kp$ (24 h)	$\sum Kp = (v-262)/6.3$
Ballif 等 (1969)	Kp (3 h)	$Kp = 9[1-\exp(-\sigma B_{\rm T} n^{-0.35}/7.7)]$
Arnoldy (1971)	AE (1 h)	$AE = -0.26\Big(\sum B_{\rm s}\tau\Big)_0 - 0.91\Big(\sum B_{\rm s}\tau\Big)$ $= -0.33\Big(\sum B_{\rm s}\tau\Big)_2 + 0.12P_0$
Bobrov (1973)	Kp (3 h)	$Kp = f(v, B_z, \Delta B_z)$
Garrett 等 (1974)	ap, AE (1 h)	$ap, AE \propto C_1 + C_2 v\langle B_{\rm s}\rangle + C_3 v\sigma$
Murayama 等 (1975)	AE (1 h)	$AE = CB_{\rm s}v^2$
Burton 等 (1975)	Dst (2.5 min)	${\rm d}Dst^*/{\rm d}t = F(E) - aDst^*$
Crooker 等 (1977)	Ap (24 h)	$Ap = 3.5\times10^{-5}\bar{B}_z\bar{v}^2 - 1.9$
Svalgaard (1977)	am (3 h)	$am = 6.6q(f,\alpha)\Big(\frac{Bv_0}{21}\Big)\Big(\frac{nv_0^2}{105}\Big)^{1/3}\times\frac{1.157}{(1+3\cos^2\psi)^{2/3}}$
Maezawa (1979)	AL (1 h)	$AL \propto B^{0.85}v^{2.08}(\sin\theta)^{0.54}$
Maezawa (1979)	AU (1 h)	$AU \propto B^{0.67}v^{1.15}(\sin\theta)^{0.34}$
Maezawa (1979)	am (1 h)	$am \propto B^{1.03}v^{2.34}(\sin\theta)^{0.37}n^{0.2}$
Holzer 等 (1979)	AL (1 h)	rate of erosion ${\rm d}\phi_{\rm e}/{\rm d}t = 0.2(1.9\times10^{10}{\rm cm})B_z v_{\rm sw}$ (km/s) rate of return ${\rm d}\phi_{\rm r}/{\rm d}t = 1.8\times10^{10}\ AL$ (nT)
Murayama (1979)	AL (1 h)	$AL = 60(B_{\rm s}+0.5)v^2F(X,B_y)n^{0.13}$
Perreault 等 (1978)	ε (能流)	$\varepsilon = vB^2\sin^4(\theta/2)l^2$
Kan 等 (1979)	E (IMF 电场)	$E = vB_{\rm t}\sin^2(\theta/2)$
Stamper 等 (1999)	P_α (能流)	$P_\alpha = [k\pi/2\mu_0^{(1/3+\alpha)}]m_{\rm sw}^{(2/3-\alpha)}M_{\rm E}^{2/3}N_{\rm sw}^{(2/3-\alpha)}v_{\rm sw}^{(7/3-2\alpha)}B^{2\alpha}\sin^4(\theta/2)$
Newell 等 (2007)	$\Phi_{\rm mp}$ (磁层顶开磁通量)	${\rm d}\Phi_{\rm mp}/{\rm d}t = v^{4/3}B_{\rm t}^{2/3}\sin^{8/3}(\theta/2)$
Borovsky (2008)	$\varepsilon_{\rm B}$ (向日面重联率)	$\varepsilon_{\rm B} = A0.4\mu_0^{1/2}\sin(\theta/2)\rho_{\rm o}v_0^2(1+0.5M_{\rm ms}^{-2})(1+\beta_{\rm s})^{-1/2}$ $[C\rho_0+(1+\beta_{\rm s})^{-1/2}\rho_{\rm m}]^{-1/2}[(1+\beta_{\rm s})^{1/2}+1]^{-1/2}$

改进的耦合函数, 如 Stamper 等的太阳风功率函数 [36]、Newell 等的开磁通生成速率函数 [24]、Borovsky 的向日面重联率函数 [25] 等, 它们与太阳风能量输入有直接联系.

作为 SMI 耦合统计研究的总结, Vasyliunas 等 [13] 提出了耦合函数的普遍形式

$$P = \rho v^3 l_{\rm CF}^2 F(M_{\rm A}^2, H, R, \theta).$$

该式的第一部分 ($\rho v^3 l_{\rm CF}^2$) 为太阳风冲击到磁层顶迎风面上的动能流, 其中, $l_{\rm CF}^2$ 表示能量输入的有效面积; 第二部分无量纲函数 $F(M_{\rm A}^2, H, R, \theta)$ 表示能量耦合率 α (见 (2) 式), 它既决定于太阳风参数 (太阳风阿尔芬马赫数 $M_{\rm A}$、雷诺数 R、IMF 钟表角 θ), 也与电离层参数有关 (H 为与电离层皮德森电导率有关的无量纲数, 而皮德森电导率与电流回路以及焦耳加热有关). 值得注意的是, 该式第一次考虑了电离层对能量耦合率的影响. 后来的数值模拟证明, 电离层不仅仅是消耗能量的能汇, 而且还影响着磁层顶的重联率, 起着一种主动作用 [22]. Vasyliunas 的公式被用于各种不同的观测资料, 得到了许多形式相似, 但指数不同的耦合函数 [37−38].

改善太阳风能量输入估计的途径很多, 其中较简单而有用的一种方法是增大或减小耦合函数中磁层迎风面积. 另一种途径是除考虑磁重联外, 还考虑太阳风与磁层顶之间似粘滞作用对能量输入的贡献 [5,20,16].

3 磁层–电离层系统对太阳风能量输入的响应

MI 系统对太阳风能量注入的响应特征首先表现在时间滞后 $\tau_{\rm lag}$ 上, 此外还表现出非线性响应 (储存、

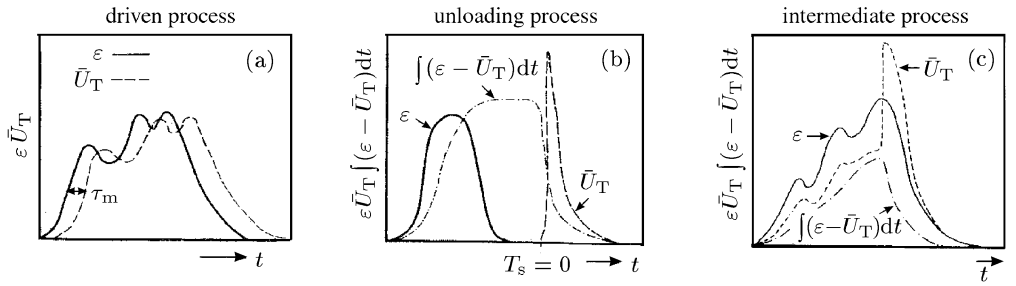


图 2 太阳风能量输入与消耗的关系. (a) 直接驱动过程, (b) 加卸载过程, (c) 直接驱动和加卸载两种过程同时存在的情况

Fig. 2 Relationship between the solar wind energy input and its dissipation in MI system. (a) directly driven process, (b) loading-unloading process, (c) coexist of both processes

卸载)、耦合率变化等一系列更复杂的特征. 因此, MI 系统对太阳风的响应是一个非常复杂的多因素过程.

一般来说, MI 系统对直接驱动过程的响应可以近似为一个定时滞后 (τ_{lag} = const) 的线性过程 (见图 2a), 因而, 可以使用时序相关的方法检验能量收支平衡关系. 但是, 能量储存和卸载过程是一个极其复杂、极其多变的非线性过程, 能量输入和输出瞬时值的相关性一般不高 (见图 2b). 由于直接驱动和加卸载两个过程总是同时相伴而存在, 其相对大小又随太阳风和磁层的条件及耦合进程而变化, 所以二者很难分离 (见图 2c).

在早期研究中, 使用的资料多是小时值, 统计分析表明, 在大多数场合下, τ_{lag} = 1 h 可以给出最高的相关系数 [10,12,37−38]. Bargatze 等 [39] 使用线性预报滤波技术, 分析了 IMP8 卫星的 34 段高时间分辨率太阳风资料和 *AL* 指数的相关关系, 发现 MI 系统对太阳风响应的滞后相关曲线有两个高峰, 一个为 20 min, 一个为 60 min (见图 3). 他们认为, 前者对应于直接驱动过程, 后者对应于加卸载过程. 取 τ_{lag} = 1 h 大体可以同时兼顾两种过程的滞后响应.

但是, Bargatze 等的滞后时间计算只取到 3 h, 更长的滞后无从知道. 仔细观察 Bargatze 等的滞后相关曲线不难发现, 在两峰之后, 曲线有很长的拖尾, 这说明磁层响应的滞后时间可能分布在一个很宽的范围内, τ_{lag} = 1 h 只是一个最可几值, 更长的或更短的滞后都有可能发生. Davis 和 Parthasarathy 早就发现 [40], 磁暴主相的大小与主相极大值之前 10 h 的积分 DP 活动性有关. 虽未见到更长滞后的报道, 但是不能排除这种可能性.

长的响应滞后时间有着更深刻的物理含义, 它暗

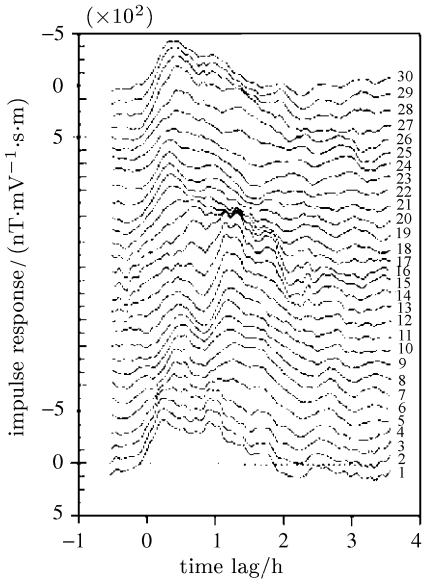


图 3 MI 系统对太阳风响应的滞后相关曲线

Fig. 3 Delay response of the MI system to solar wind

示着太阳风能量输入 MI 系统后, 并不立即释放干净, 很有可能在该系统中运行和储存相当长的时间. 之后的释放也许更多地决定于 MI 系统本身的状态和条件, 而不是当时或此前太阳风的能量输入. 关于这一点, 目前几乎没有开展研究, 但是毫无疑问, 它对最后弄清 MI 系统的能量状态和能量过程至关重要.

4 环电流的能量消耗

极区电离层、环电流和磁尾是 MI 系统的 3 个主要能汇. 据粗略估计, 进入 MI 系统的太阳风能量约有 1/3 消耗于环电流.

根据 Dessler-Parker-Sckopke 关系 [41−42], 环电

流能量可以表示为

$$E(t) = M_{\rm dp} Dst^*(t)/2 = 3E_{\rm m} Dst^*(t)/2B_0. \quad (4)$$

式中, Dst^* 为经过太阳风动压改正后的 Dst 指数, 表示环电流在地心处产生的磁场, $M_{\rm dp}$ 为地球偶极磁矩 ($M_{\rm dp} \approx 8\times10^{22}\,{\rm Am}^2$), B_0 表示地球主磁场 (假定为偶极场) 的赤道地表磁场, $E_{\rm m}$ 表示地表外主磁场的总能量 ($E_{\rm m} \approx 8.4\times10^{17}\,{\rm J}$). 环电流能量的增长率等于外部能源的输入功率 $\dot{U}_{\rm r}$ 减去环电流能量的自然衰减 (即主要由电荷交换引起的能量消耗), 据此, Burton 等 [9] 得到了用 Dst^* 表示的环电流能量变化率公式, 转化到 SI 单位制 $t[s], \tau_{\rm r}(s), Dst(T), \dot{U}_{\rm r}(W)$, 有

$$\dot{U}_{\rm r} = -4\times10^{22}({\rm d}Dst^*/{\rm d}t + Dst^*/\tau_{\rm r}). \quad (5)$$

公式左端表示注入环电流的能流; 右端括号中第一项表示环电流的增长, 第二项表示环电流的衰减率, $\tau_{\rm r}$ 为环电流的衰减时间常数 (即环电流粒子寿命).

虽然环电流能量表达式有很好的物理基础, 但是, 在具体计算环电流能量时会遇到以下三个不确定因素, 它们极大地影响着式 (5) 的实际应用效果.

(1) Dst 指数计算的不确定性

Dst 指数是用 4 个地面台站的地磁 H 分量变幅得到的. 但是, 地面 H 分量变化并不完全来自对称环电流, 对它有贡献的还有磁尾电流、磁层顶电流、场向电流、部分环电流以及地球内部感应电流. 根据磁层电流模型和统计计算, 对称环电流对 Dst 指数的贡献只占 27%, 而部分环电流的贡献占 29%, 近地越尾电流的贡献甚至达到 50%. 地球内部感应电流对 Dst 的贡献在磁暴主相期间约为 30%, 恢复相降为 20% 以下 [43]. 陈博等 [44] 指出, 环电流对赤道面的倾斜对 Dst 指数也有显著影响. 除此之外, 台站数量的多少及其分布, 数据时间分辨率的高低对 Dst 指数的确定也有一定影响 [45].

(2) Dst 指数压力改正的不确定性

太阳风压力变化会在向日面磁层顶产生变化的 C-F 电流, 该电流影响地面磁场 H 分量的大小, 进而影响 Dst 指数的计算和环电流能量的估计. 因此, 在由 Dst 指数计算环电流能量时, 必须首先从指数原始值中消除太阳风压力影响. 常用的压力改正公式为

$$Dst^* = Dst - (b\sqrt{P} - c).$$

式中, 太阳风压力 P 为太阳风速度 v 和质量密度 ρ 的函数, 有 $P = \rho v^2$; 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. Burton 等 [9] 估计, 平静环电流的贡献约为 5 nT, 平静太阳风动压的贡献约为 15 nT. 不同作者使用不同太阳风资料, 得到的不同改正常数列于表 2[8−9,46−51]. 改正常数的不同会在一定程度上造成能量计算结果的差异.

(3) 环电流衰减时间 $\tau_{\rm r}$ 的不确定性

在磁暴的不同阶段, 环电流衰减时间 $\tau_{\rm r}$ 可能变化几十倍, 极大地影响着环电流能量计算和注入能量 $\dot{U}_{\rm r}$ 的估计, 从而影响着整个 SMI 能量平衡关系. 特别是在磁暴主相期间, Dst 绝对值很大而 $\tau_{\rm r}$ 很小, 式 (5) 右端括号中第二项占优势, $\tau_{\rm r}$ 的影响更大. 图 4 为不同 $\tau_{\rm r}$ 值的对比. 表 3 列出几种 $\tau_{\rm r}$ 值, 其差别之大一目了然 [31,40,46,49−50,52−54].

表 2 Dst 指数太阳风压力改正公式中的系数

Table 2 Coefficients for the correction of solar wind ram pressure

作者 (年代)	b	c	说明
Siscoe 等 (1968)	$0.14\,{\rm nT/(eV\cdot cm^{-3})^{-1/2}}$		$1\,{\rm eV} = 1.602\times10^{-19}\,{\rm J}$ $1\,{\rm nT} = 10^{-9}\,{\rm T}$
Ogilvie 等 (1968)	$0.17\,{\rm nT/(eV\cdot cm^{-3})^{-1/2}}$		
Verzariu 等 (1972)	$0.35\,{\rm nT/(eV\cdot cm^{-3})^{-1/2}}$		
Su and Konradi (1975)	$0.43\,{\rm nT/(eV\cdot cm^{-3})^{-1/2}}$	19 nT	
Burton 等 (1975)	$0.20\,{\rm nT/(eV\cdot cm^{-3})^{-1/2}}$	20 nT	
Gonzalez 等 (1989)	$15.8\,{\rm nT\cdot nPa^{-1/2}}$	20 nT	$1\,{\rm nT/(eV\cdot cm^{-3})^{1/2}} = 79.05\,{\rm nT\cdot nP^{-1/2}}$
O'Brien 等 (2000)	$7.26\,{\rm nT\cdot nPa^{-1/2}}$	11 nT	
Turner 等 (2001)	$8.74\,{\rm nT\cdot nPa^{-1/2}}$	11.54 nT	

表 3 环电流的十种衰减时间常数 $\tau_{\rm r}$

Table 3 Ten models of the ring current decay rate

作者 (年代)	衰减时间 $\tau_{\rm r}$/h	模型代码
Burton 等 (1975)	7.7	BM1975
Davis 等 (1967)	5, $Dst=-20\,\mathrm{nT}$ 7, $Dst=-30\,\mathrm{nT}$ 10, $Dst=-40\,\mathrm{nT}$ 24, $Dst=-50\,\mathrm{nT}$ 10, $Dst<-50\,\mathrm{nT}$	DP1967
Perreault 等 (1978)	20, $\varepsilon<500\,\mathrm{GW}$ 1, $\varepsilon>500\,\mathrm{GW}$	PA1978
Gonzalez 等 (1989)	4, $Dst\geqslant-50\,\mathrm{nT}$ 0.5, $-50>Dst\geqslant-120\,\mathrm{nT}$ 0.25, $Dst<-120\,\mathrm{nT}$	GT1989
Gonzalez (1993)	4, $Dst\geqslant-50\,\mathrm{nT}$ 2, $-50>Dst>-100\,\mathrm{nT}$ 1, $-100>Dst>-200\,\mathrm{nT}$ 0.5, $-200>Dst\geqslant-300\,\mathrm{nT}$ 0.25, $Dst<-300\,\mathrm{nT}$	G1993
Akasofu (1981)	20, $\varepsilon<100\,\mathrm{GW}$ 6, $100<\varepsilon<500\,\mathrm{GW}$ 3, $500<\varepsilon<1000\,\mathrm{GW}$ 1, $1000<\varepsilon<5000\,\mathrm{GW}$ 0.3, $5000<\varepsilon<10000\,\mathrm{GW}$ 0.2, $\varepsilon>10000\,\mathrm{GW}$	A1981
Pudovkin 等 (1988)	$3.0+9.8\exp(-F/4.5)F(\mathrm{nT\cdot h^{-1}\cdot mV^{-1}\cdot m})=$ $-3.5+4.3\times10^{-3}v(\mathrm{km/s})[0.5\sigma(\mathrm{nT})$ $-B_z(\mathrm{nT})]/4.5$	PG1988
O'Brien 等 (2000)	$2.4\exp[9.74/(4.69+vB_{\rm s})]$ (mV/m)	OM2000
MacMahon 等 (2008)	$(\alpha/Dst)^{3/2}$, $\alpha=-150$	ML2008
Xu 等 (2010)	$1/[0.1+3.0\times10^{-4}\varepsilon(\mathrm{GW})]$	XD2010

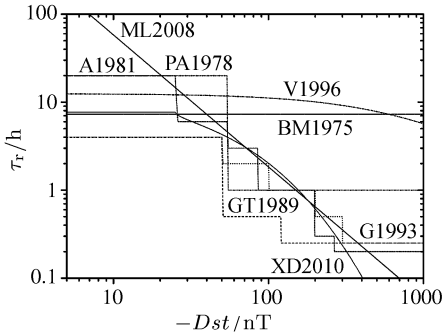


图 4 几种环电流衰减时间常数 $\tau_{\rm r}$ 的比较

Fig. 4 Comparison of few schemes of the ring current decay time

Dst 指数计算简单, 使用方便, 时间序列长, 又有一定的物理意义. 迄今为止, 尚无更好的指数替代 Dst 指数来表征环电流能量, 所谓 SYM 指数与 Dst 指数基本同义, 只是台站较多, 时间分辨率较高而已. 但是, Dst 指数不断受到质疑 [55−56], 非环电流磁场对 Dst 指数的 "污染" 在很大程度上影响着环电流能量的正确计算, 模糊着 Dst 指数的含义 [53,57−60]. 与此同时, 式 (4) 的适用性也屡遭怀疑. Carovillano 和 Siscoe[61] 的研究显示, 对于大的 Dst 指数, 式 (4) 高估环电流能量 50%∼200%, 而对于小的 Dst 指数, 该式高估环电流能量 10%∼20%. 至于

式 (4) 是否适用于更一般的情况, 讨论仍在进行中, 这挑战着 Dst 指数的物理基础 [51,62].

5 极区电离层焦耳加热损耗

最近的资料分析表明, 极区电离层的焦耳加热超过环电流耗能 [6,16,63]. 通常认为, 粒子沉降及其伴随的场向电流和等离子体波是磁层与电离层耦合的主要途径, 也是极区电离层/热层加热、电离、辐射的主要来源, 其以电离、发射、韧致辐射等方式直接影响电离层, 通过增大电离层皮德森电导率间接导致了焦耳加热损耗, 通过增大电离层霍尔电导率而产生地磁扰动.

焦耳加热取决于电场和皮德森电导率, 主要发生在电离层. 但是在太阳质子事件期间, 低热层和中层的焦耳加热也相当可观, 因为电离层电场可以几乎无损耗地穿透到中层, 甚至到地面, 而太阳质子引起中层粒子电离, 从而增大了这里的皮德森电导率 [64]. Lu 等 [4] 的研究指出, 热层中性风对焦耳加热的贡献可达 28%. 迄今为止, 焦耳加热尚无连续的直接测量方法. 一种间接测量方法是建立焦耳加热与地磁指数的经验关系, 然后用地磁指数来描述焦耳加热 [10,65−67]. 另一种方法是利用 AMIE 技术计算半球或全球焦耳加热 [20].

最早的焦耳加热经验关系是推导 ε 函数时使用的 $\dot{U}_{\rm J}({\rm GW}) = 0.2AE$ (nT)[10,12]. 近来的研究指出, 早期的工作明显低估了焦耳加热. Lu 等 [20] 用 AMIE 技术得到北半球焦耳加热率与极光电集流指数 AL 的统计关系, 即

$$\dot{U}_{\rm J}^{nh}({\rm GW}) = 0.21 \sim 0.549(-AL)({\rm nT}).$$

如果忽略南北半球差异, 并借助近似统计关系 $AL \approx -0.78AE$, 用 AE 代替 AL[68], 则可以得到全球焦耳加热率 $\dot{U}_{\rm J}({\rm GW}) = 0.33 \sim 0.84AE({\rm nT})$, 这明显大于 Pereault 和 Akasofu 推导 ε 函数时使用的焦耳加热. Tanskanen 等 [69] 利用 IMAGE 子午台链的局地极光电集流指数 IL, 得到北半球焦耳加热率的统计关系

$\dot{U}_{\rm J}^{nh}({\rm GW}) = 0.3IL({\rm nT})$, 如果用 AL 代替 IL, 类似地可以得到全球焦耳加热率 $\dot{U}_{\rm J}({\rm GW}) = 0.47AE({\rm nT})$, 也比早期的估计值大 1 倍左右. 利用 1996—2008 年的 AMIE 焦耳加热资料, 还可以建立新的焦耳加热函数, 即

$$\dot{U}_{\rm J}({\rm GW}) = 0.08AE^{1.26}({\rm nT}). \quad (6)$$

式 (6) 表明, 对于强扰动, 焦耳加热率增长加快.

6 极光粒子沉降的能量损耗

极光粒子沉降改变电离层电导率, 从而调制着极光电集流强度. 所以, AE 和 AL 指数通常用来连续监测极光粒子沉降的能耗. 在能量耦合计算中, 曾经被广泛使用的是 Akasofu 经验关系 $\dot{U}_{\rm a}({\rm GW}) = 0.1AE({\rm nT})$[10,12,37−38], 它等于焦耳加热的一半. 后来又陆续出现了许多类似的经验关系式. 其中, 有简单的线性关系式 $\dot{U}_{\rm a} = aAE + b$, 式中的系数 a 为 0.1∼0.26 GW/nT, b 为 0∼136 GW; 也有较为复杂的非线性关系式.

利用极光观测, 特别是极轨卫星极光成像资料, 可以更直接地反映极光粒子沉降的耗能. Østgaard 等 [16] 分析了 7 次孤立亚暴期间 Polar 卫星的 X 射线和 UV 图像资料, 得到了一个非线性经验关系式 $\dot{U}_{\rm a}({\rm GW}) = 4.4AL^{1/2}$ (nT) − 7.6. 刘晓灿等 [70] 用 1978—2006 年 NOAA/POES 系列极轨卫星的极光沉降粒子能量数据, 也得到类似的结果. 在这些经验关系式中, 方次 $\alpha < 1$ 意味着, 在强活动时期, 极光粒子能耗增长减慢, 类似于饱和现象. 这一特点与焦耳加热刚好相反, 可参见式 (6).

7 磁尾能量的消耗、储存及返回下游太阳风

磁尾能量除了随对流返回下游太阳风的那部分外, 其余能量一部分通过对流、高速流 (BBF)、粒子和波的注入等方式输送到内磁层, 并消耗在环电流和极区电离层, 这部分能量已经计入环电流、焦耳加热、极光离子沉降的能耗之中. 还有一部分能量消耗在磁层加热上. 最后, 还有一部分能量驻留 (储存) 在磁尾中.

长期以来, 处理日地能量耦合问题所用的基本公式是式 (1). 它意味着, MI 系统从太阳风得到的净能量 ($\dot{E}_{\rm mi} = \dot{E}_{\rm in} - \dot{E}_{\rm out}$), 完全在该系统中消耗掉了. 事实上, 更可能的情况是, MI 系统得到的净能量有一

部分并未立即消耗, 而是储存在磁尾, 或暂时, 或持久, 参与以后的能量释放. 也就是说, 进入 MI 系统的能量不是一分为二, 而是一分为三: MI 系统的总能耗 $\dot{U}_{\rm tt}$ (包括磁尾加热)、该系统 (主要是磁尾) 储能的增加 $\dot{E}_{\rm t}$、由系统向外流出的能量 $\dot{E}_{\rm out}$ (参见图 1), 即

$$\dot{E}_{\rm in} = \dot{U}_{\rm tt} + \dot{E}_{\rm t} + \dot{E}_{\rm out}. \qquad (7)$$

这里所说的 "MI 系统能量储存" 不同于通常意义上的亚暴加卸载过程中的能量暂时储存. 过去的能量研究也注意到 "磁尾储能", 特别是亚暴增长相的磁尾储能和随后膨胀相突始的放能过程. 在计算 MI 系统能量收支平衡时, 常常用一定的响应滞后时间近似加以考虑, 也就是说, 认为磁层储能–放能是一个短暂的过渡过程, 于是才有了式 (1)∼(3).

磁尾动力学虽然已有很深入的研究, 但是, 一些与能量有关的基本问题尚未解决, 例如, 磁尾储能能有多久? 储能总量能有多大? 变化过程有何特征? 储能过程在日地能量耦合中起何作用? 这些都是值得进一步研究的问题.

磁尾重联产生的磁岛等离子体团, 向远磁尾运动, 最终没入下游太阳风, 于是把进入磁层的一部分能量又返回到太阳风, 这就是图 1 中的 $\dot{E}_{\rm out}$. 这种物理图像看来是合理的, 卫星观测也常常看到尾向高速流.

但是, 目前还没有测量和计算返回下游太阳风能量 $\dot{E}_{\rm out}$ 的有效手段, 更谈不到连续监测. 粗略估计, 由磁尾返回下游太阳风的能量约为进入 MI 系统能量的 1/3, 但是, 这基本不能用于具体计算. 与上述磁层储能问题一样, 这也是 MI 系统能量收支计算中遇到的最棘手的问题之一.

目前, 人们通常采用的一种权宜之计是, 并不分别考虑 $\dot{E}_{\rm in}$ 和 $\dot{E}_{\rm out}$, 而是考虑二者之差, 即 $\dot{E}_{\rm mi} = \dot{E}_{\rm in} - \dot{E}_{\rm out}$, 以此作为 MI 系统得到的净能量, SMI 耦合效率也以此为准进行计算, 这一问题可参考式 (2).

8 平静期间的能量积累和释放

人们关注磁暴、亚暴这样的典型能量事件, 这无疑是对的. 但是往往忽视了平静无暴期间的能量过程. 事实上, 太阳风向地球磁层的能量传输从未停止过, 只不过传输的能量有多有少罢了, 磁层的 "半波整流" 特性只是对能量过程的概念性描述和近似. 事实上, 即使在 IMF 持续北向期间, 能量传输和消耗从未停息, IMF 北向期间也发生磁暴和亚暴就是证明 [71]. 特别是在太阳活动低年, 活动期短暂而平静期甚长, 活动期能量输入率虽大但时间较短, 而平静期能量输入率虽小但持续时间很长, 其积分能量输入不容忽视. 所以, 有必要在一段长时间内连续监测磁层能量输入–储存–消耗的全过程, 既关注磁暴和亚暴, 又注意无暴平静段. 图 5 给出第 23 太阳周低年 2008 年和高年 2003 年, SMI 耦合过程中能量输入和消耗的时间积分曲线. 图 5 中最明显的特征是

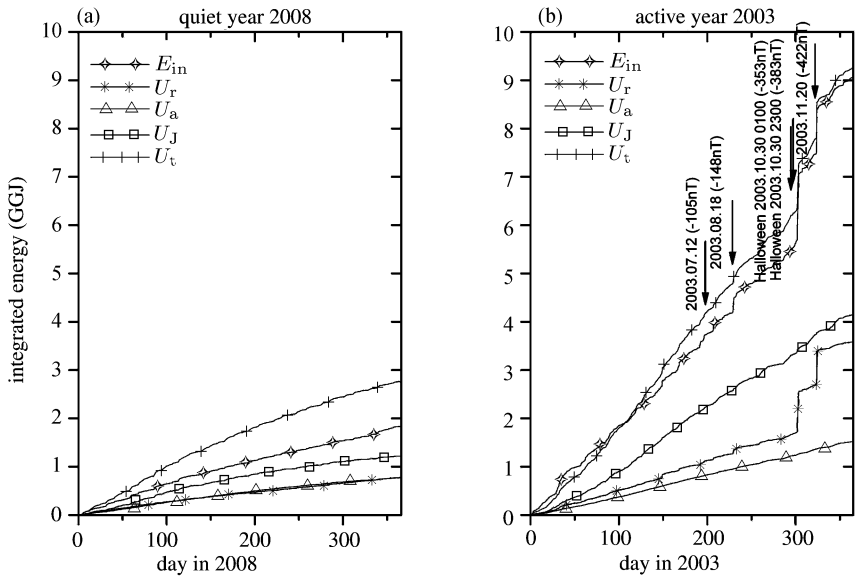


图 5 SMI 能量耦合过程中能量输入和能量消耗的时间积分

Fig. 5 Integrated energies in the SMI coupling process

磁磁暴发生时能量输入和消耗的显著增强 (见图 5b), 但是, 平静时期能量的缓慢输入和消耗也不可忽视 (见图 5a).

9 能量在不同能汇中的分配

太阳风能量在 MI 系统中不同能汇中的分配比例是检验能量耦合函数是否合适的重要依据. 这里, 只讨论 MI 系统的三个主要能汇 (环电流、焦耳加热、极光粒子沉降) 的能耗比例 $U_{\rm r}:U_{\rm J}:U_{\rm a}$.

Perreault 和 Akasofu[10,12] 用经典 ε 函数, 得到环电流能耗占一半以上的结论. 增大 ε 函数的有效面积, 以增加磁层能量输入, 从而使长期能量平衡符合得更好 [72]. 经过这样修正后得到的结论与 Akasofu 的结论基本一致, 即 $U_{\rm r}:U_{\rm J}:U_{\rm a}=52.6\%:31.6\%:15.8\%$.

最近的研究指出, Perreault-Akasofu 的结果高估了 $U_{\rm r}$, 而低估了 $U_{\rm J}$ 和 $U_{\rm a}$[6,46,51,63]. Gonzalez 等 [48] 检验了强磁暴资料, 得到焦耳加热 $U_{\rm J}$ 占总能耗的 60%, 在三个能汇中上升为绝对的第一位. Østgaard 等 [6] 分析了 7 个孤立亚暴事件, 得到 $U_{\rm J}$ 占 56%. 如果考虑环电流在地球内部的感应电流对 Dst 指数的贡献, 将环电流能耗公式中的系数 4.0×10^4 减小 1/3, 得到的 $U_{\rm r}$ 将进一步减小. Knipp 等 [5] 对 1993 年 11 月磁暴得到相同结论. 但是, Lu 等 [20] 分析了 1997 年 1 月磁暴, 得到的 $U_{\rm J}$ 只有 48%. Turner 等 [51] 检验了 1995—2004 年期间的 280 个磁暴, 对 91 个 CIR 磁暴得到 $U_{\rm r}:U_{\rm J}:U_{\rm a}=10\%$: 68%: 22%, 对 118 个 CME 磁暴, 得到 $U_{\rm r}:U_{\rm J}:U_{\rm a}=12\%$: 71%: 17%. 但是必须指出, 他们对强磁暴使用了过长的环电流衰减时间 ($\tau_{\rm r}=6\,{\rm h}$), 从而低估了环电流能耗. MacMahon 等 [31] 检验了 4 个超强磁暴 ($Dst<-240\,{\rm nT}$) 的能耗分配, 发现超强磁暴与亚暴有明显差异, 在超强磁暴期间, 焦耳加热约为环电流能耗的一半, 而在亚暴期间, 焦耳加热是环电流的 2 倍.

上述不同结果列于表 4, 以供比较. 由表 4 可以看出, 不同能汇耗能的差异取决于太阳风驱动条件 (例如 CME、CIR、复杂抛射等), 也取决于地磁活动强度和活动事件类型 (例如磁暴、亚暴、高强度长时间连续 AE 活动等). 一般来说, 当地磁活动较弱时, 环电流很不发育, 主要耗能在极区电离层, 其中

表 4 MI 系统中不同能汇的能耗分配

Table 4 Energy partitioning in the energy sinks of the MI system

作者 (年代)	$U_{\rm r}$/(%)	$U_{\rm J}$/(%)	$U_{\rm a}$/(%)	其他/(%)	注 释
Perreault 等 (1978)	55	30	15		由图近似估计, $U_{\rm r}$ 偏高
Akasofu (1981)	55	30	15		由图近似估计, $U_{\rm r}$ 偏高
徐文耀和杜爱民 (2010)	52.6	31.6	15.8		$U_{\rm r}$ 偏高
Gonzalez 等 (1989)	17	60	23		强磁暴
Prigankova 和 Feldstein (1992)	30 ~ 92	70 ~ 8			4 个磁暴, 4 种 τ_r 模型, 2 种 AE 指数模型. 考虑地下感应电流, 减小环电流系数, $A=-2.7\times10^4$
Lu 等 (1998)	30	48	22		1997 年 1 月磁暴
Østgaard 等 (2002)	15	56	29		7 个亚暴, 其间只有一个小磁暴 ($Dst=-48\,{\rm nT}$, $Kp=4+$)
	26	44	30		小磁暴主相期 $U_{\rm r}$ 大增
Turner 等 (2009)	10	68	22		(1) 1995—2004 年期间 91 个 CIR 磁暴. (2) $\tau=6\,{\rm h}$ 太大. (3) 为消除地内感应电流和磁尾电流影响, 用 $54\%Dst^*$ 计算环电流能耗, 太小
	12	71	17		(1) 1995—2004 期间 118 个 CME 磁暴. (2) (3) 同上
Mac-Mahon 等 (1997)	25~40	16~24	35~60		4 个超级磁暴 ($Dst<-240\,{\rm nT}$)

U_J 占优; 而在强磁暴期间, 虽然每个能汇的能耗均有增加, 但是, 环电流增强更显著, 其耗能也有较大增强, 此时, U_J 所占的比例可能下降, 而 U_r 的比例可能增大.

10 评价能量函数的准则

评价 SMI 能量耦合函数的基本准则是能量守恒原理. 但是具体评价方法可以不同. 总结已有的和可能有的准则, 大致有 4 类 [6,12,72].

(1) 瞬时能量指标 (Instant 指标, 简称 I 指标)

根据能量守恒原理, 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, 可以称之为 "瞬时指标".

但是, 如下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改变, 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. 然而, 实际情况要复杂得多. 现在可以知道, 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逐渐储存和随后突然释放, 它的滞后时间很不确定, 用线性预报滤波等技术估计得到的结果有较大分歧. 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[73] 等比较了 1996—1998 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, 二者相差大于 15%, 对于小亚暴, 相差更多.

瞬时能量指标被广泛用来检验磁暴和亚暴事件的能量收支平衡问题, 由此得到最佳拟合函数 [10,12,20−21,71,74]. 但是, 研究中屡屡发现, 能量消耗并不能严格跟随能量输入. 于是需要新的指标.

(2) 事件积分能量指标 (Event 指标, 简称 E 指标)

为了最大限度地减小磁层响应滞后的不确定性和太阳风传播的简化近似所带来的影响, 我们不关心每一时刻的能量平衡, 而是考察整个磁暴或亚暴事件期间总的能量输入和消耗, 它们应该是平衡的, 这就是 "磁暴 (亚暴) 事件总能量平衡" 指标, 即磁暴 (亚暴) 全过程的积分能量收支平衡. Østgaard 等 [6,16] 用这种指标检验了 7 个孤立亚暴, 并估计了能量在磁暴和亚暴间的分配. 我们也曾根据 E 指标, 用 1998—2003 年 44 个磁暴事件, 对 4 类典型的环电流衰减率模型进行了数值检验和比较研究, 并据此挑选出较好的候选模型 [72].

(3) 长期积分能量指标 (Long interval 指标, 简称 L 指标)

亚暴事件持续只有一小时到几小时, 磁暴事件也不过持续几小时到几天. 但是, 磁层能量储存的时间尺度可能更长, 因此, MI 系统能量收支平衡也许需要更长的时间. 作为 E 指标的自然延伸, 我们可以检验几年、十几年或更长时段内积分能量收支平衡情况, 这就是 "长期总能量平衡指标". 对第 23 太阳周 (1998—2008)11 年的长期能量收支进行数值检验, 有助于进一步筛选候选模型 [72].

(4) 预报指标 (Prediction 指标, 简称 P 指标)

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, 可称为预报指标 (简称 P 指标)[17,24,75−76]. 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. Newell 等 [24] 用这条指标检验了 20 种耦合函数 (包括 ε 函数), 用到的变量多达 10 个 (5 个地磁指数, 5 个其他指数), 证明磁通量开放速率 $\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{mp}}/\mathrm{d}t$ 预报地磁活动最好.

在评价预报效率 (prediction efficiency) 时需要特别注意其真实含义, 谨防误导. O'Brien 等 [49] 用他们的模型分析了两个磁暴, 得到一小时预报效率分别为 97.2% 和 97.7%. 乍看很好, 但是由于地磁变化的持续性, 即使假定 Dst 在一小时内完全不变, 也可以得到 95% 的预报效果. 所以他们认为, 一个较好的评价指标应该是 "技术分数" (skill score), 它表示所使用的预报模型可以预报 Dst 变化中的多大一部分. 对于上述两个磁暴, O'Brien-McPherron 模型的这一技术分数分别为 36.7% 和 31.6%. 也就是说, 该模型仅能解释 Dst 变化的 1/3.

上述 4 条指标相结合, 才能对耦合函数作出较客观和较全面的评价.

综上所述, 半个世纪的 SMI 耦合研究取得了突破性进展, 但是离完全理解耦合过程的目标还相去甚远. 这里遇到的困难是双重的, 即过程本身的复杂性和观测的不足. 耦合过程的复杂性源于现象的多重性 (涉及电磁的、流体力学的、粒子的过程)、空间尺度和时间尺度的多重性. 观测上的不足表现在地面观测虽然久远和连续, 但远离关键作用区, 空间卫星观测虽然可以提供原地信息, 但几个关键区同时有卫星观测的机会太少, Cluster、双星、THEMIS 等卫星组的方案是可以寄予希望的观测.

参考文献

[1] Stern D P. Energetics of the magnetosphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 1984, **39**:193-213

[2] Kamide Y, Baumjohann W. Magnetosphere-ionosphere coupling [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1993

[3] Tsurutani B T, Gonzalez W. The efficiency of 'viscous interaction' between the solar wind and the magnetosphere during intensenorthward IMF events [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**:663-666

[4] Lu G, Richmond A D, Emery B A, *et al.* Magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling: effect of neutral wingd on energy transfer and field-aligned current [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A10):19643-19659

[5] Knipp D J, Emery B A, Engebretson M, *et al.* An overview of the early November 1993 geomagnetic storm [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:26 197-26 220

[6] Østgaard N, Germany G, Stadsnes J, *et al.* Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A9):1233, doi:10.1029/2001JA002002

[7] Gonzales W D, Joselyn J A, Kamide Y, *et al.* What is a geomagnetic storm [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:5771-5792

[8] Siscoe G L, Formisano V, Lazarus A J. A calibration of the magnetopause [J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**:4869

[9] Burton R K, McPherron R L, Russell C T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst* [J]. *J. Geophys.Res.*, 1975, **80**:4204

[10] Perreault P, Akasofu S I. A study of geomagnetic storm [J]. *Geophys. J. Res. Astron. Soc.*, 1978, **54**:547

[11] Kan J R, Lee L C. Energy coupling and the solar wind dynamo [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1979, **6**:577

[12] Akasofu S I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 1981, **28**:121-190

[13] Vasyliunas V M, Kan J R, Siscoe G L, *et al.* Scaling relations governing magnetospheric energy transfer [J]. *Planet Space Sci.*, 1982, **30**:359-365

[14] Tsurutani B T, Slavin J A, Kamide Y, *et al.* Coupling between the solar wind and the magnetosphere: CDAW 6 [J]. *J. Geophys. Res,*. 1985, **90**:1191-1199

[15] Baujmiohanm W. Some recent progress in substorm studies [J]. *J. Geomagn. Geoelec.*, 1986, **38**:633

[16] Østgaard N, Vondrak R R, Gjerloev J W, *et al.* A relation between the energy deposition by electron, precipitation and geomagnetic indices during substorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002b, **107**(A9):1246, doi:10.1029/2001JA002002

[17] Siscoe G, McPherron R L, Liemohn M W, *et al.* Reconciling prediction algorithms for *Dst* [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A02215, doi:10.1029/2004JA010465

[18] Merkin V G, Sharma A S, Papadopoulos K. *et al.* Global MHD simulations of the strongly driven magnetosphere: Modeling of the traspolar potential saturation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A09203, doi:10.1029/2004JA010993

[19] Lu G, Richmond A D, Emery B A, *et al.* Interhemispheric asymmetry of the high-latitude ionospheric convection pattern [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A4):6491-6510

[20] Lu G, Baker D N, Farrugia C J, *et al.* Global energy deposition during the January 1977, magnetic cloud event [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:11 685-11 694

[21] Lu G. High-speed streams, coronal mass ejections, and interplanetary shocks: A comparative study of geoeffectiveness [R]//Recurrent Magnetic Storms: Cototating Solar Wind Streams. Tsurutani B, McPherron R, Gonzalez W, *et al* ed. Washington, D C: AGU, 2006

[22] Hu Y Q, Guo X C, Wang C. On the ionospheric and reconnection potentials of the Earth: Results from global MHD simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**:A07215, doi:10.1029/2006JA012145

[23] Shi J K, Qureshi M N S, Ma S Z, *et al.* The energy release of substorm and magnetic storm: Its present state and future improvements by KuaFu mission [J]. *J. Adv. Space Res.*, 2007, doi:10.1016/j.asr.2007.02.024

[24] Newell P T, Sotirelis T, Liou K, *et al.* A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, A01206, doi:10.1029/2006JA012015

[25] Borovsky J E. The rudiments of a theory of solar wind/magnetosphere coupling derived from first principles [J]. *J. Geophys.Res.*, 2008, **113**, A08228, doi:10.1029/2007JA012646

[26] Turner N E, Cramer W D, Earles S K, *et al.* Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-drivenstorms [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2009, **71**:1023-1031

[27] Hamilton D C, Gloeckler G, Ipavich F M, *et al.* Ring cur-

rent development during the Great Geomagnetic Storm of February 1986 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**:14 343-14 355

[28] Fok M C, Kozyra J U, Nagy A F, *et al.* Decay of equatorial ring current ions and associated aeronomical consequences [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:19 381-19 393

[29] Jordanova V K, Farrugia C J, Janoo L, *et al.* October 1995 magnetic cloud and accompanying storm activity: Ring current evolution [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:79-92

[30] Keika K, Nose M, Brandt P, *et al.* Contribution of charge exchange loss to the storm time ring current decay: IMAGE/HENA observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, A11S12, doi:10.1029/2006JA011789

[31] MacMahon R M, Llop-Romero C. Ring current decay time model during geomagnetic storms: a simple analytical approach [J]. *Ann. Geophys.*, 2008, **26**:2543-2550

[32] Shue J H, Chao J K, Fu H C, *et al.* A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:9497-9511

[33] Dungey J W. Interplanetary magnetic fields and the auroral zones [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **6**:47

[34] Axford W I, Hines C O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms [J]. *Can. J. Phys.*, 1961, **39**:1433

[35] Wu Hongzhong, Du Heng. Comparison of the correlations between the interplanetary parameters and geomagnetic indices [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1986, **6**(3):196-202. In Chinese (吴洪钟, 都亨. 行星际参量和地磁指数相关关系之比较 [J]. 空间科学学报, 1986, **6**(3):196-202)

[36] Stamper R, Lockwood M, Wild M N. Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A12):28 325-28 342

[37] Xu Wenyao, Shi Enqi. Numerical examination of Akasofu'senergy coupling function [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1986, **6**(1):24-32. In Chinese (徐文耀, 师恩琦. Akasofu 能量耦合函数的数值检验 [J]. 空间科学学报, 1986, **6**(1):24-32)

[38] Lu Wensong, Xu Wenyao. On solar wind-magnetosphere energy coupling during northward IMF [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1997, **40**(1):1-10. In Chinese (陆文松, 徐文耀. 行星际磁场北向时太阳风–磁层的能量耦合 [J]. 地球物理学报, 1996, **39**(5):577-587)

[39] Bargatze L F, Baker D N, McPherron R L, *et al.* Magnetospheric impulse response for many levels of geomagnetic activity [J]. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(A7):6387-6394

[40] Davis T N, Parthasarathy R. Relationship between polar magnetic activity DP and growth of the geomagnetic ring current [J]. *J. Geophys. Res.*, 1967, **72**:5825-5836

[41] Dessler A J, Parker E N. Hydromagnetic theory of geomagnetic storms [J]. *J. Geophys. Res.*, 1959, **64**:2239-2252

[42] Sckopke N. A general relation between energy of trapped particles and disturbance field near Earth [J]. *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**:3125-3130

[43] Hakkinen L V Y, Pulkkinen T I, Nevanlinna H, *et al.* Effects of induced currents on *Dst* and on magnetic variations at midlatitude stations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A1):1014

[44] Chen Bo, Xu Wenyao, Chen Gengxiong, *et al.* Latitudinal shift and tilt of the ring current during magnetic storms [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2008, **53**:1-9. In Chinese (陈博, 徐文耀, 陈耿雄, 等. 磁暴期间环电流的纬向移动与倾斜现象 [J]. 科学通报, 2008, **53**(17):2096-2103)

[45] Mendes Jr O, Mendes da Costa A, Bertoni F C P. Effects of the number of stations and time resolution on *Dst* derivation [J]. *J. Atmos. Solar-Terres. Phys.*, 2006, **68**:2127-2137

[46] Feldstein Y I. Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters [J]. *Space Sci. Rev.*, 1992, **59**:83-165

[47] Pudovkin M I, Graffe A, Zaitseva S A, *et al.* Calculating the *Dst* variation field on the basis of solar wind parameters [J]. *Gerlands Beitr. Geophys.*, 1988, **97**:525-533

[48] Gonzalez W D, Tsurutani B T, Gonzalez A L C, *et al.* Solar wind-magnetosphere coupling during intense magnetic storms (1978-1979) [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:8835-8851

[49] O′Brien T P, McPherron R L. Forecasting the ring current index *Dst* in real time [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**:1295-1299

[50] O'Brien T P, McPherron R L. An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:7707-7720

[51] Turner N E, Baker D N, Pulkkinen T I, *et al.* Energy content in the storm time ring current [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:19 149-19 156

[52] Cummings W D. Asymmetric currents and the low latitude disturbance daily variation [J]. *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**:4495-4503

[53] Dasso S. Ring current decay rates of magnetic storms: A statistical study from 1957 to 1998 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A5), 10.1029/2000JA000430

[54] Ballatore P, Gonzalez W D. On the estimates of the ring current injection and decay [J]. *Earth Planet Space*, 2003, **55**:427-435

[55] Campbell W H. Geomagnetic storms, the Dst ring current myth and lognormal distributions [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**:1171-1187

[56] Campbell W H. Failure of *Dst* index filed to represent a ring current [J]. *Space Weather*, 2004, **2**, S08002, doi:10.1029/2003SW000041

[57] Alexeev I I, Belenkaya E S, Kalegaev V V, *et al.* Magnetic storms and magnetotail currents [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:7737-7747

[58] Dremukhina L A, Feldstein Y I, Alexeev I I, *et al.* Structure of the magnetospheric magnetic field during magnetic storms [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:28 351-28 360

[59] Liemohn M W, Kozyra J U, Thomsen M F, *et al.* Dominant role of the asymmetric ring current in producing the storm time Dst [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A6):10 883-10 904

[60] Kamide Y, Maltsev Y P. Geomagnetic Storms [M]//Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Kamide Y, Chian A ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 355-374

[61] Carovillano R L, Siscoe G L. Energy and momentum theorems in magnetospheric dynamics [J]. *Rev. Geophys.*, 1973, **11**:289-353

[62] Greenspan M E, Hamilton D C. A test of the Dessler-Parker-Sckopke relation during magnetic storms [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:5419-5430

[63] Koskinen H E J, Tanskanen E I. Magnetospheric energy budget and the epsilon parameter [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**:1415-1424

[64] Roble R G, Emery B A, Killeen T L, *et al.* Joule heating in the mesosphere and thermosphere during the July 13, 1982 solar proton event [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A6):6083-6090

[65] Spiro R W, Reiff P H, Mather Jr L J. Precipitating electron energy flux and auroral zone conductances: An empirical model [J]. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**:8215-8227

[66] Ahn B H, Akasofu S I, Kamide Y. The Joule heat production rate and the particle energy injection rate as a function of the geomagnetic indices AE and AL [J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**:6275-6287

[67] Richmond A D. Global measures of ionospheric electrodynamic activity inferred from combined incoherent scatter radar and ground magnetometer observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**:1061-1071

[68] Xu Wenyao, Kamide Y. Decomposition of daily geomagnetic variation by using method of natural orthogonal component [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A5):A05218

[69] Tanskanen E, Pulkkinen T I, Koskinen H E J, *et al.* Substorm energy budget during low and high solar activity: 1997 and 1999 compared [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A6):1086, doi:10.1029/2001JA900153

[70] Liu Xiaocan, Chen Gengxiong, Xu Wenyao, *et al.* Relationship of the auroral precipitating particle power with AE and Dst indices [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2008, **51**(4):686-693. In Chinese (刘晓灿, 陈耿雄, 徐文耀, 等. 极光沉降粒子能量与 AE、Dst 指数的相关分析 [J]. 地球物理学报, 2008, **51**(4):968-975)

[71] Du A M, Tsurutani B T, Sun W. Anomalous geomagnetic storm of 2122 January 2005: A storm main phase during northward IMFs [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**, A10214, doi:10.1029/2008JA013284

[72] Xu W Y, Du Aiming. Effects of the ring current decay rate on the energy state of the magnetosphere [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2010, **53**(6):1247-1255. In Chinese (徐文耀, 杜爱民. 磁暴环电流衰减率对磁层能量状态的影响 [J]. 地球物理学报, 2010, **53**(6):1247-1255)

[73] Petrukovich A A, Kallio E I, Pulkkinen T I, *et al.* Solar wind energy input and magnetospheric substorm activity compared [G]//Proceedings of 5th International Conference on Substorm, 2000, 63-70

[74] Zhang J, Richardson I G, Webb D F, *et al.* Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst = -100$ nT) during 1996–2005 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, A10102, doi:10.1029/2007JA012321

[75] Li X, Oh K S, Temerin M. Prediction of the AL index using solar wind parameters [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, A06224, doi:10.1029/2006JA011918

[76] Newell P T, Sotirelis T, Liou K, *et al.* Pairs of solar wind-magnetosphere coupling functions: Combining a merging term with a viscous term works best [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**, A04218, doi:10.1029/2007JA012825