

磁层 - 电离层耦合

■ 徐文耀 译

>>>>>

Magnetosphere-
Ionosphere Coupling

上出洋介 W. 鲍明翰 著



科学出版社

www.sciencep.com

空间物理与化学 第23卷

行星学

编辑: M. C. E. 胡伯尔(荷兰 诺德韦克)

L. J. 兰兹罗梯(美国 默里山)

D. 施特夫勒(德国 明斯特)

磁层-电离层耦合

上出洋介 W. 鲍明翰 著

徐文耀 译

孙炜 校

科学出版社

北京

图字:01-2005-2286号

内 容 简 介

大尺度磁层过程显示了日地相互作用中所涉及的物理联系。在过去20年当中,接连不断的卫星直接观测和广泛的计算机模拟使我们认识到,在这些大尺度磁层过程中,极区电离层起着重要作用。业已证明,诸如极光、电场和电流等高纬电磁现象有着极其复杂的时空变化。现在我们面临的挑战是如何认识和理解地球磁层-电离层系统中大量的复杂观测结果。本书论述了在热而稀薄的磁层等离子体与冷而稠密的电离层等离子体之间发生的电磁耦合,并详细讨论了在认识基本观测现象如何相互联系时遇到的困难以及这种认识的意义。

本书可供从事空间物理、地球环境、空间天气预报的专业人员阅读,也可以作为高等院校有关专业研究生参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

磁层-电离层耦合/上出洋介 W. 鲍明翰著;徐文耀译. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-014755-3

I. 磁… II. ①上…②徐… III. 磁层-电离层耦合 IV. P352

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 005006 号

责任编辑:彭胜潮 言静霞 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

Translation from the English Language edition;

Magnetosphere-Ionosphere Coupling by Yohsuke Kamide and Wolfgang Baumjohann

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1993

Springer is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年4月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005年4月第一次印刷 印张: 10 1/2

印数: 1—1 000

字数: 195 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

谨以此书献给克里斯多夫 K. 戈尔茨,一位空间物理学界最富创新的科学家和带头人,一位备受尊敬的教师,我们最好的朋友。他的贡献推动着空间物理学的发展!

中文版前言

——致我们的中国朋友、同事和本书读者

日地能量耦合的研究是空间物理学中的一个基本课题,而磁层-电离层耦合则是这一复杂能量过程链中的重要环节。我们最终的目的是以自洽的形式认识整个耦合链,并深入理解其中的每个环节。由于空间和地面观测的局限性,这一认识过程不可能一蹴而就。所幸的是,新的、令人兴奋的直接观测与日俱增,数值模拟技术飞速进步,所有这些为我们深入认识这一耦合链提供了必要的条件。

我们很高兴地看到《磁层-电离层耦合》一书由徐文耀先生翻译成中文。这本书是十多年以前出版的,它包括磁层和电离层这两个空间环境中重要区域之间相互作用的基本概念、数学处理方法、有关的探测结果以及未来需要研究的问题。虽然在我们的记录中不断增加和积累着新的磁暴-亚暴事件,但本书所包括的材料,从成书之日直到现在,都是适用的和有价值的。

共享我们的知识,交换我们的想法,对于促进空间科学向前发展是非常重要的。我们衷心希望,本书中文版的出版在这一研究领域能够发挥重要作用。

上出洋介

W. 鲍明翰

2004年7月

英文版前言

在过去的 20 年中,新的直接观测与日俱增。这些新的观测事实强调指出,地球磁层与电离层之间紧密电磁耦合是十分重要的。这个区域中发生的耦合过程意味着在热而稀薄的磁层等离子体与冷而稠密的电离层等离子体之间存在着活跃的相互作用。正是在这个区域中,带电粒子以很高的效率被加速。如果不从整体上考察相互耦合的磁层-电离层系统,我们就无法从物理上理解极区电离层观测到的纷繁现象以及磁层中发生的许多电动力学过程。

电场、电流、粒子沉降和极光等高纬电磁现象的时空变化是电离层-磁层系统动力学过程的表现,业已证明,这些变化是极其复杂的。当今的一个挑战性问题是如何理解和综合在我们地球环境中不同地点和不同时间观测到的大量复杂现象。最近,通过大量的计算机模拟和数字模型的建立,人们试图从基本假设出发,重现观测的重要特征,这方面的研究已经取得了显著进展。

通过批判性地检验现在已经知道了什么,以及最近的将来还需要研究什么,来评价我们对磁层-电离层耦合过程认识的现状,是非常适时的。但是本书并不是一篇详尽无遗的综述文章,不管从哪方面来说,它都不敢妄称是完美无缺的。我们的主要目的也不是总结已被普遍接受的观点和论述。因为,对于这种尝试来说,这个活跃的研究领域扩展得太快了。

必须指出,本书所包括的内容仅限于磁层-电离层系统中的大尺度过程,它们具有非线性和时变的性质,而且在这些大尺度过程中,还发生着许多小尺度过程。我们的目的是给出磁层和电离层全球电磁耦合的一个基本理论框架,选择那些对该系统来说带根本性的重要动力学现象进行讨论。我们强调指出,阐明特定现象发生并且能够被仪器测到的条件是重要的。我们衷心希望,本书将会促进对磁层和电离层的认识。阅读本书的读者需要有良好的电磁学知识,并熟悉电离层和磁层中的现象。

感谢我们的同事,感谢他们有益的讨论、交谈和鼓励,因为人名太多,恕不一一列出。我们感谢 L. 兰兹罗梯,是他建议我们为《空间物理与化学》丛书撰写一本书。甘如石、西田、A. D. 里奇蒙德和 R. A. 沃尔福等人对本书最后定稿所提出的批评性评论是非常有益的,没有他们的努力,本书将不会是现在这样的形式和内容。我们要特别感谢美国大气研究中心高山天文台,本书最后定稿的一些部分是在它的赞助下完成的。

上出洋介

W. 鲍明翰

1993 年 1 月

译者致谢

在本书翻译和出版过程中,肖佐教授、甘如石教授、言静霞研究员和魏自刚、杜爱民博士给予了大力协助。为了准确理解和翻译某些专业名词和表述,肖佐教授和甘如石教授给了译者不少帮助,魏自刚博士扫描了全部插图,杜爱民博士完成了校对稿的输入和传送,言静霞研究员承担了本书出版的联系工作。对于他们的热心和所付出的辛勤劳动,译者表示衷心的感谢。

徐文耀

2004年7月15日

目 录

中文版前言

英文版前言

译者致谢

1 磁层-电离层耦合的含义	1
1.1 太阳风、磁层和电离层	1
1.1.1 磁层的能量输入	3
1.1.2 亚暴中的能量消耗	5
1.2 磁层-电离层耦合的基本性质	9
1.2.1 全球和局地的耦合过程	9
1.2.2 等离子体对流	10
1.2.3 理论方法	11
2 高纬度电场和电流的形态学	14
2.1 大尺度电流体系	15
2.1.1 对流电集流	15
2.1.2 楔状亚暴电流	19
2.1.3 极盖和极隙电流	21
2.1.4 晨侧扇区的东向电流	25
2.1.5 磁层中电流的闭合	25
2.1.6 场向电流的载流子	28
2.2 伴随极光的电场和电流	29
2.2.1 极光弧	30
2.2.2 西行浪涌	33
2.2.3 欧米伽形极光带	39
2.2.4 脉动极光片	42
3 磁层-电离层耦合的全球建模	45
3.1 基本概念	45
3.2 磁层对流的模拟	47
3.2.1 全球对流模型	48
3.2.2 等离子体输运模型	52

3.3	观测特征的重现	56
3.4	特定物理过程的耦合模型	58
4	电离层电动力学的建模	64
4.1	场向电流控制的电离层参数	64
4.1.1	基本算法	64
4.1.2	平静期	66
4.1.3	亚暴期	73
4.1.4	极隙结构	77
4.2	地磁图反演技术	80
4.2.1	方案的要点	80
4.2.2	优点和局限性	83
4.2.3	电离层参数的全球分布	84
4.2.4	近来的改进	91
4.3	极光弧的形成	98
5	磁层-电离层耦合的现代课题	101
5.1	西行浪涌	101
5.1.1	动力学	101
5.1.2	对流图案的畸变	104
5.1.3	脉动	106
5.2	极光粒子加速和平行电场	107
5.2.1	观测	107
5.2.2	理论和计算机模拟	111
5.3	高纬电场向低纬区的渗透	114
5.3.1	亚暴效应	114
5.3.2	源机制	115
5.3.3	电离层电场的全球图案	116
5.3.4	磁层中对流电场的屏蔽	117
5.4	电导率和电场的相对重要性	118
5.4.1	电离层参数的同时测量	118
5.4.2	两种电集流模式	122
5.4.3	极光电集流的纬度剖面	122
5.4.4	亚暴动力学的含义	125
5.4.5	未来的问题	128
	参考文献	131
	名词索引	152

1 磁层-电离层耦合的含义

地球磁层是一个巨大的等离子体物理学实验室,其外边界是磁层顶和太阳风,内边界是电离层。这些边界不是稳定边界,而是动态变化的区域。边界层重要的等离子体参数与磁层内部的参数不同,在这里发生着独特的物理过程。

由于磁层顶、磁层和电离层被地磁场磁力线穿连在一起,在这些不同的区域之间发生着动量和能量的交换,因此,发生在各个区域中的动力学过程必然相互作用,相互调节,产生一种新型的物理过程。

为了理解磁层的全球特征,必须把太阳风-磁层-电离层系统看作一个整体。但是,要完全认识磁层与其上、下边界之间的耦合是很困难的,因此,在现阶段人们仍然倾向于把系统分割开来,分别处理太阳风-磁层耦合和磁层-极区电离层相互作用。

1.1 太阳风、磁层和电离层

地球磁层是一个充满热而稀薄的等离子体空腔,它被包埋在稠密而较冷的快速流动的太阳风等离子体之中。由于地球磁场的作用,太阳风不能直接进入磁层外边界(即磁层顶),而在地球弓激波处被减速到亚音速之后,绕着磁层顶流过(例如 Russell 1987)。如图 1.1 所示,太阳风激波的动压在地球的向日面压缩偶极子地磁场,而在夜晚一侧则把地磁场拉伸成一个长长的尾状结构,远远伸展到月球轨

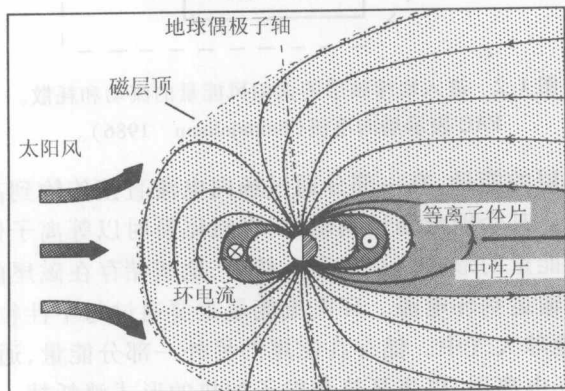


图 1.1 地球磁层在正午-子夜子午剖面内的形状。

道以外。在距离较远的磁尾,磁场不再像偶极子磁场,而是由磁场近乎反平行的两个分离区域组成,其间的转换区通常叫做中性片。

在中性片附近,磁尾的中心部分充填着能量为几千电子伏特(keV)的等离子体,这个区域叫做等离子体片,它通过磁力线与极光电离层相连。能量为几十 keV 的能量离子在接近地球时被反弹回来,并在地磁场汇聚的南北电离层之间来回跳跃,同时在磁场梯度漂移和磁场曲率漂移的影响下向西漂移。离子的这一西向漂移形成了一个显著的环绕地球的电流,因而这个区域又叫做环电流。

对于典型的太阳风状态,入射到向日面磁层顶(横截面尺度约为 $30R_E$, R_E 为地球半径)的太阳风动能通量约为 10^4 GW。其中一部分动能通量通过不同的物理机制被吸收而进入地球磁层,这些能量在磁层中分散,暂时储存,最后释放到内磁层、外磁层和极区电离层,并在那里消耗掉。整个过程如图 1.2 所示。

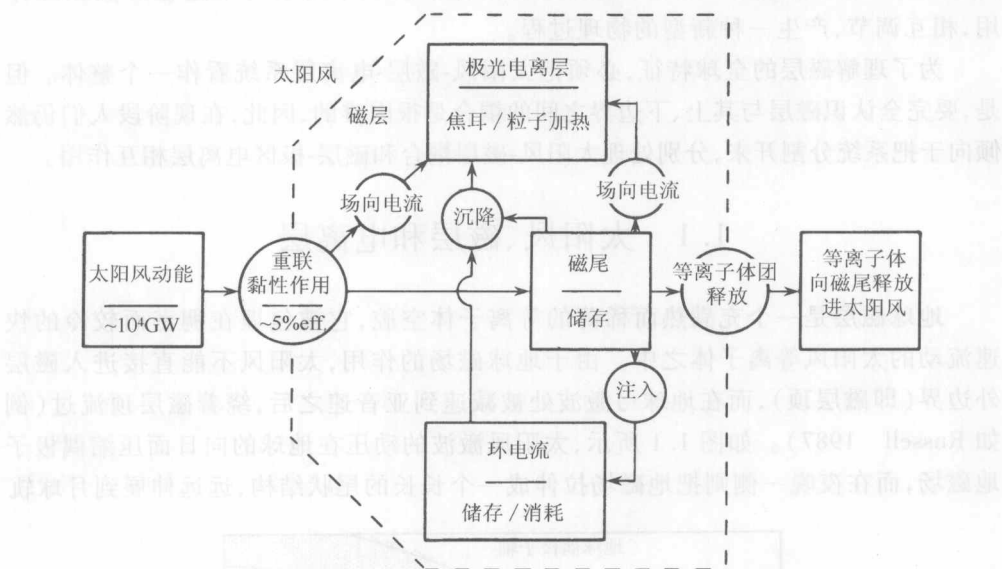


图 1.2 进入地球磁层的太阳风能量的流动和耗散。

FAC 表示场向电流 (Baumjohann 1986)。

进入向日面磁层的能量,有一部分通过场向电流直接传输到高纬电离层,以焦耳热的形式消耗掉。其余能量输运到磁尾,在磁尾暂时以等离子体的动能、热等离子体能量以及磁场能量的形式储存起来。然后,这些储存在磁尾的能量,一部分通过粒子注入的方式输运到环电流。环电流能量主要通过与中性粒子的电荷交换消耗掉,最后损失在地球大气中。储存在磁尾的另外一部分能量,通过粒子沉降和场向电流,输运到极光电离层,以焦耳热和粒子加热的形式消耗掉。其余能量不是消耗在磁层中,而是通过等离子体团向远处磁尾释放,重新进入下游太阳风。

根据数量级估计,在强烈扰动期间,大约有 800GW 的能量消耗在上面所说的极区电离层、环电流和远磁尾三个区域中,三个区域消耗的能量差不多。在比较平静的条件下,能量消耗率约为 200GW。将此能量消耗与入射的能量通量(10^4GW)相比较,可知太阳风-磁层耦合效率约为 5%。这 5% 的能量通量是通过不同的传输过程进入磁层的。在下一节,我们将评价这些能量传输过程的相对重要性,即它们对整个耦合效率的贡献。在 1.1.2 节中我们将注意主要的能量消耗过程,这就是磁层亚暴。

1.1.1 磁层的能量输入

磁层顶的能量耦合过程主要可分为两种不同类型:①磁重联或磁力线合并过程。这一过程指的是太阳风磁场(即行星际磁场 IMF)与地球磁场在向日面磁层顶的相互作用(Dungy 1961);②其他“非磁场”机制。我们通常称之为类黏滞相互作用,因为这些机制表明,通过微观或宏观不稳定性所产生的某种黏滞性,使切向动量从磁鞘等离子体通过磁层顶输入到磁层内部(Axford and Hines 1961)。图 1.3 画出了这两种过程及其产生的磁层等离子体流动。磁重联过程在极盖和磁尾瓣的开放场线区域驱动一个向尾的等离子体流,而类黏滞过程则在闭合磁力线的低纬边界层中驱动一个向尾的等离子体流(例如 Eastman et al. 1976)。这两种过程的对流循环都是通过内磁层中的向日对流而实现的。

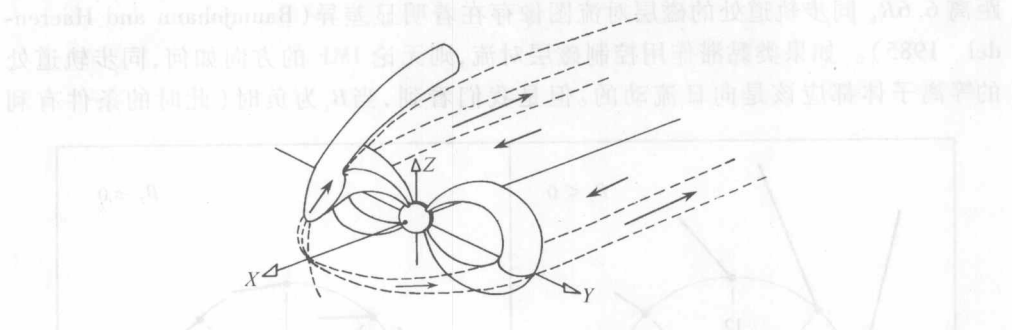


图 1.3 在太阳风的驱动下,磁层中产生对流运动的两种基本过程:磁重联和类黏滞相互作用。X 轴指向太阳,Y 轴指向黄昏(Cowley 1982)。

地球磁层顶的磁重联以定常态重联和间歇性时变重联两种形式发生(例如 Vasylunas 1975)。卫星观测提供了日下点附近准定常态重联的实测证据(例如 Paschmann et al. 1979),也提供了碎片状脉冲式重联(所谓通量传输事件 FTE)的证据(例如 Russell and Elphic 1979)。重联过程强烈地依赖于行星际磁场与地磁场之间的夹角:当这两个磁场反平行时重联发生最有效,而当这两个磁场完全平行时,重联停止。重联过程可以将太阳风的质量和磁通量(或电位)通过磁层顶

输入磁层,以代替那些因沉降到大气层而损失掉的粒子,并保持平均强度的磁层对流(Hill 1983)。

类黏滞作用主要有两种机制:一种是由于微观不稳定性所产生的共振波的随机散射,磁鞘粒子通过磁层顶扩散进入低纬边界层(例如 Tsurutani and Thorne 1982);另一种是低纬磁层顶两翼的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性(一种宏观不稳定性),尤其是当它演变成非线性形式的时候(例如 Miura 1984)。这两种过程可以不依赖于外部磁场的方向而独立进行,但是,任何一个过程都不能单独达到质量传输和电位的观测要求。扩散过程若以可能的最大速率进行,原则上勉强可与磁重联相比(Hill 1983),但是,即使是所产生电位的上限值也仍然低于经验量值。非线性 Kelvin-Helmholtz 不稳定性虽然能够提供经验所要求的电位,但是,如果没有别的扩散或重联过程,它不能提供任何质量输运。

如上所说,重联过程和类黏滞作用最显著的、也是容易被观测到的差别是,前者依赖于外磁场的方向(用行星际磁场 B_z 分量的正负号表示),而后者则与外磁场方向无关。在过去的 20 年中,这种与行星际磁场 B_z 分量的依赖关系已经用于 IMF 变化与地磁活动性的许多相关研究之中(参见 Murayama 1982; Maezawa and Murayama 1986; Akasofu 1981 的汇总表)。从行星际磁场与磁层或电离层电场的相关性可以得到关于重联作用和类黏滞作用相对重要性的最可靠的度量。

图 1.4 表明,在 IMF $B_z < 0$ (即行星际磁场为南向)和 $B_z > 0$ (北向)期间,径向距离 $6.6R_E$ 同步轨道处的磁层对流图像存在着明显差异(Baumjohann and Haerendel 1985)。如果类黏滞作用控制磁层对流,则无论 IMF 的方向如何,同步轨道处的等离子体都应该是向日流动的。但是我们看到,当 B_z 为负时(此时的条件有利

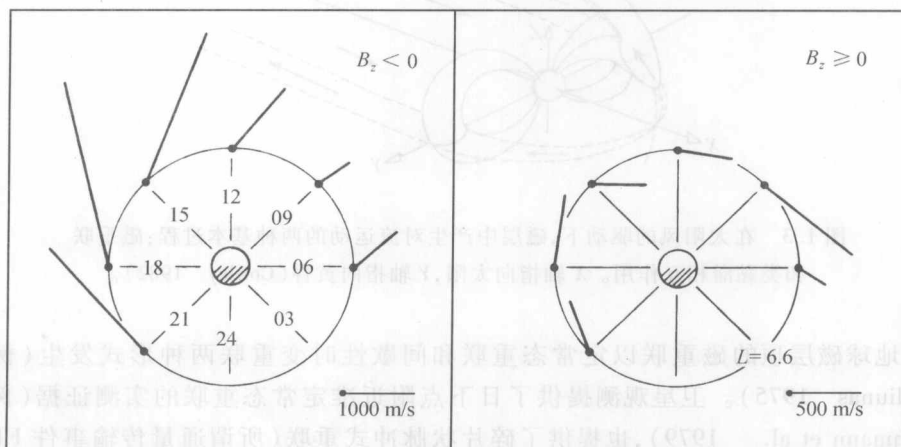


图 1.4 在 IMF B_z 分量为正和为负的情况下,GEOS-2 电子枪实验在 $L = 6.6R_E$ 处所测到的等离子体 $E \times B$ 漂移矢量(在共旋参考架内)(Baumjohann and Haerendel 1985)。

于重联发生), 等离子体向日流动, 而在北向 B_z 期间 (B_z 为正), 等离子体流动大致是一种顺时针环流。在后一种情况下, 太阳风发电机过程显然不太有效, 而地球磁层对流受到电离层发电机作用的强烈影响。

根据早期低高度卫星跨极盖区电位 Φ_{pc} 的测量, 许多人研究了 Φ_{pc} 与行星际电场东西分量 (即 IMF 的南北分量) 的相关性 (例如 Reiff et al. 1981; Rich and Maynard 1989; Weimer et al. 1990)。所有这些研究都指出, Φ_{pc} 与 IMF B_z 分量有显著的依赖关系, 这表明观测到的 Φ_{pc} 变化与重联有关。但是, 指出下面一点很重要, 即这些研究还表明, 当 B_z 的时均值为正时, 也存在一个相当大的跨极盖电位。Wygant 等人 (1983) 考虑前 4 小时的太阳风和行星际磁场条件, 假定对流的非调制分量与类黏滞过程有关, 给定了 Φ_{pc} 的上限值为 16kV。

根据 ISEE 卫星的原地测量资料, Mozer (1984) 从垂直于磁层顶的电场分量测值计算出跨越黄昏侧低纬边界层的电位。如果不考虑磁鞘 B_z 分量的符号, 他所得到的平均电位值是 2.5kV 的量级。如果假定晨侧边界层也有相似的电位值, 则平均黏滞电位应为 5kV, 这个值小于 Wygant 等人 (1983) 给出的上限值。因为典型的跨极盖电位是 50 ~ 100kV, 所以一个必然的结论是, 类黏滞作用过程所提供的电位不会超过驱动磁层对流所需总电位的 10%。另一方面重联过程除了具有与 IMF B_z 分量有关的调制特征外, 似乎还能提供经验电位值。

关于太阳风-磁层耦合的问题我们就讨论到这里, 如果读者对此问题更详细的综述感兴趣, 可以参考 Haerendel 和 Paschmann (1982)、Lee (1986)、Baumjohann 和 Paschmann (1987) 以及 Siscoe (1988) 的综述文章。

1.1.2 亚暴中的能量消耗

通过上节所述的各种传输过程进入地球磁层的能量必然要在该系统的某些地方消耗掉。当磁层顶能量传输率低的时候, 能量消耗过程是准定常态的, 而当能量输入率较高时, 磁层的反应是非稳定的, 或暴发性的。“磁层亚暴”这一术语包含着一些最基本的现象, 磁层正是通过这些现象, 试图适应增强的太阳风输入条件, 特别是在南向行星际磁场之后的时段内。

亚暴是一种全球现象, 其表现几乎遍及磁层和电离层的所有区域, 例如, 可参阅 Akasofu (1977)、Rostoker (1980) 以及 McPherron (1991) 的文章。在电离层高度上, 极光爆发, 电场畸变, 并出现强电流 (例如 Baumjohann 1983)。在同步轨道, 就在环电流区外侧, 地磁场先是被拉伸成类尾位形, 然后突然转回成偶极子位形 (例如 McPherron 1979), 同时热等离子体无色散地注入内磁层。在磁尾更远一些地方, 等离子体片首先变薄, 然后再膨胀 (例如 Hones et al. 1971)。等离子体被显著加热, 并出现高速流动 (例如 Baumjohann et al. 1989)。在远磁尾, 具有闭合磁场结构的等离子体团, 向着磁尾抛射出去 (例如 Scholer et al. 1984)。

现在有一种广泛流行的认同,即磁层亚暴是通过直接驱动和加载-卸载这样两个同时发生的基本过程进行的(Akasofu 1981; Baker et al. 1984; Rostoker et al. 1987b)。如图 1.5 所示,在增强的太阳风能量输入中,有一部分能量通过全球对流而直接消耗掉,引起对流电流增强以及粒子能量向极光电离层和环电流的注入,从而导致极光电离层焦耳加热。这个能量消耗过程与太阳风能量输入直接相关,构成驱动过程,即被太阳风直接驱动的过程(例如 Perreault and Akasofu 1979)。与此同时,增强的能量输入的其余部分先储存在地球磁尾,然后,在亚暴突发时通过极光电离层局部区域的焦耳加热和粒子加热,以及通过粒子注入环电流和等离子体团向尾释放而爆发性地释放。这第二个亚暴过程与驱动过程同时进行,叫做加载-卸载过程。

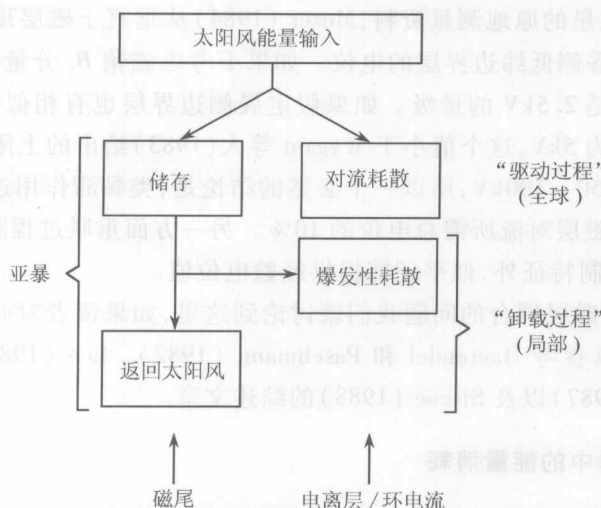


图 1.5 在磁层亚暴期间,通过驱动过程和加载-卸载过程太阳风能量的储存与耗散(Baker et al. 1984)。

图 1.6 提供了太阳风输入增强期间以及其后一段时间内,驱动过程与加载-卸载过程同时发生的示意图和某些资料(Baker et al. 1985)。南向行星际磁场使太阳风和磁层能量耦合增强,紧接着,能量储存在磁尾之中。由于系统具有电感,所以在极光电离层中能量以焦耳热形式的直接消耗有 10 ~ 20min 的时间滞后。接着,在 30 ~ 60min 之后,储存在磁尾中的能量在亚暴膨胀相期间爆发性地释放,这一过程经常(但不是一定)发生在太阳风输入减小之后。

但是应该注意,与图 1.6 给我们的印象相反,在膨胀相期间,直接能量消耗和爆发性能量消耗可能同时存在。而且这两个过程哪个占优势,也就是说哪个过程消耗的能量更多,并不是一个容易回答的问题。在图 1.6 所示的情况下,爆发性能

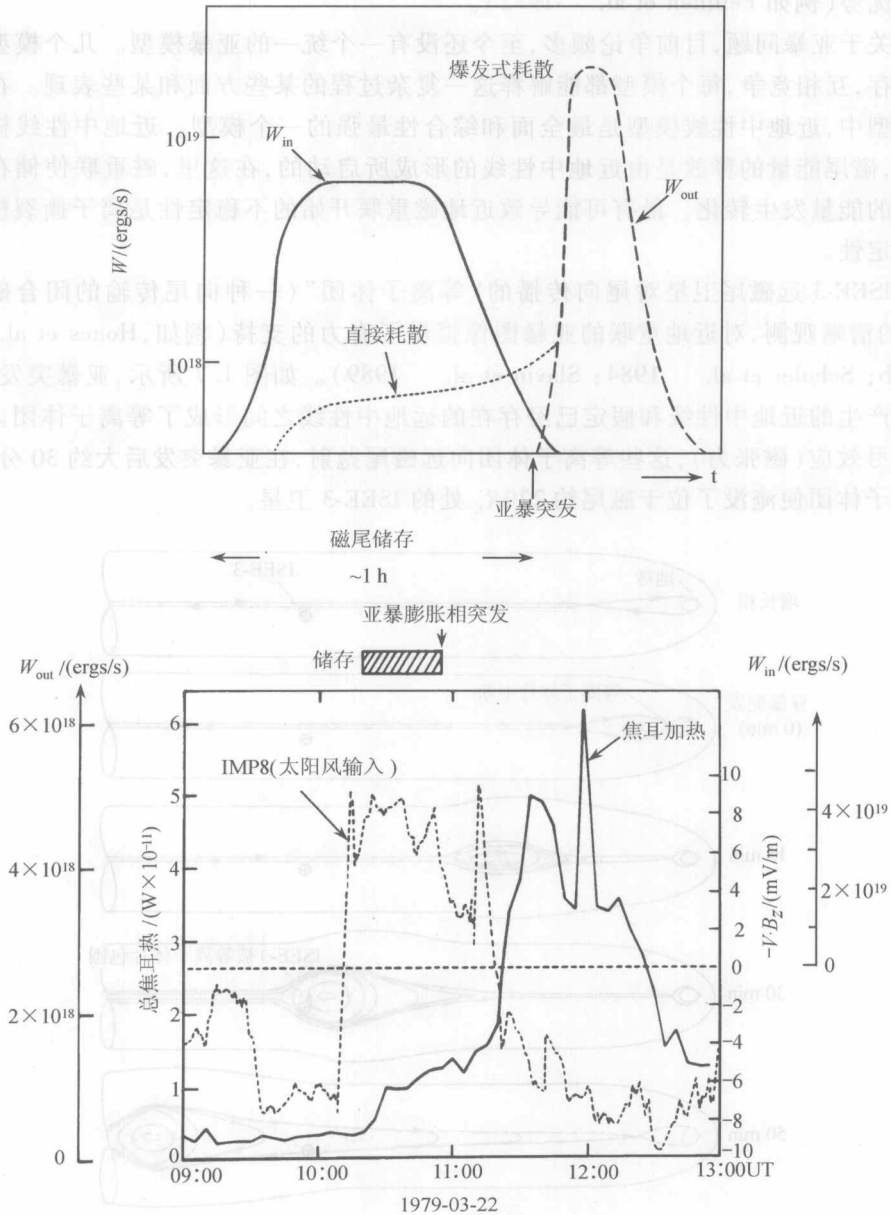


图 1.6 描述磁层亚暴期间同时发生的直接消耗(驱动过程)和磁尾能量储存与爆发性释放(加载-卸载过程)的示意图和资料(根据 Baker et al. 1985)。