第15卷 第1期 空间科学学报 Vol. 15, No. 1
1995 年 1 月 GHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan. 1995

磁层-电离层电动耦合与中纬地磁指数的变化*

资 民 筠
(中国艺术研究院,北京 100009)
沈 长 寿
(北京大学地球物理系,北京 100871)

摘 要

本文探讨磁层-电离层耦合过程内中纬地磁指数的变化特点,并与极光电集流和赤道电集流(指数)变化相比较. 相关分析和时序叠加分析均表明,高、中、低纬地磁指数变化可归结为磁层-电离层电动耦合的统一物理图象. 有 R 事件的磁暴主相初期和无 R 事件的磁扰期内,赤道电集流和中纬地磁指数的变化各不相同. 这再次证明,耦合分析中将磁层源扰动的直接穿透作用与经电离层内动力过程的效应二者加以区分和综合研究是很重要的.

关键词 磁层-电离层耦合,电集流,中纬地磁指数

一、引 言

磁层大尺度扰动初期,伴随环电流能量增长率的突然加大,极光区扰动电流会直接穿透到中低纬电离层[1-3],与赤道电集流闭合. 直到二区场向电流充分发展,才将扰动电流基本屏蔽在极光区内[4-6]. 高纬电离层电流向低纬扩展虽必通过中纬地区,但迄今尚无恰当的地磁指数可反映中纬的变化过程. 这限制了人们对耦合过程的中纬效应研究.

本文试图在日本学者最近提供的中纬地磁指数[7]的基础上,对磁层大尺度扰动初期中纬地磁变化特点进行探索,并将其统一到磁层-电离层电动耦合的整体图象之中.

二、中纬地磁指数

中纬地磁指数包括 H 分量和 D 分量,各分量又含对称 (SYM) 变化和非对称 (ASY) 变化部分. 指数反映的是表 1 中 9 个站观测资料该分量在各时段内的变幅大小,即偏离平静态的变化程度. 研究表明[7],对称变化部分与赤道环电流指数 D_{st} 密切相关,而非对

* 国家自然科学基金资助课题.
本文于 1994 年 2 月 14 日收到.

表 1

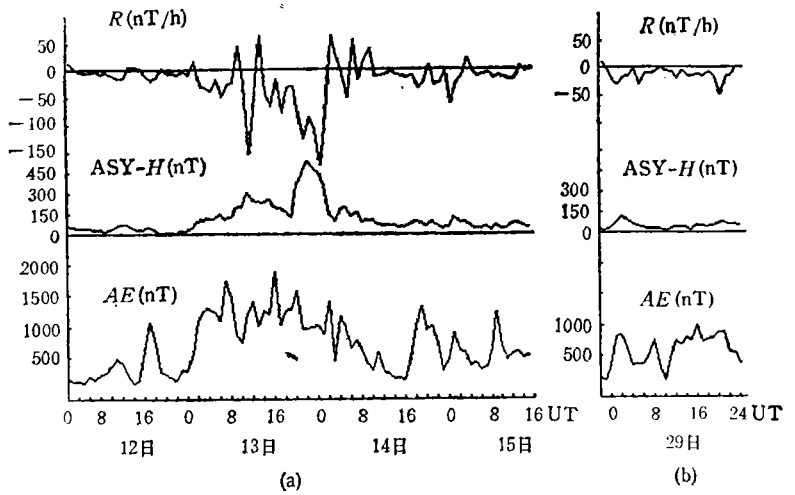
站 名	地理纬度	地理经度	地磁纬度	地磁经度	不变纬度
San Juan	18.4°	293.9°	29.1°	5.2°	32.5°
Fredericksburg	38.2°	282.6°	49.1°	355.2°	50.4°
Boulder	40.1°	254.8°	48.7°	319.0°	49.1°
Tucson	32.3°	249.2°	40.4°	314.6°	39.7°
Honolulu	21.3°	202.0°	21.5°	268.6°	20.2°
Memambetsu	43.9°	144.2°	34.6°	210.2°	34.9°
Martin de Vivies	−37.8°	77.6°	−46.9°	142.8°	48.6°
Hermanus	−34.4°	19.2°	−33.7°	82.7°	43.6°
Chambon-la-Foret	48.0°	2.3°	50.1°	85.7°	45.7°

称变化则体现了部分环电流的特性．在强磁扰时，ASY 与极光电集流 AE 指数有关联，即更体现了电离层电流系的影响．

本文中的地磁指数 D_{st}、AE 和 ASY-H(中纬 H 分量的非对称变化)均源自 WDC-C2．对赤道电集流变化的分析，则采用印度三站(见图 2c) 和我国琼中站的地磁 z 分量资料．

三、磁暴期间 ASY-H 对环电流增强的响应

为分析内磁层环电流能量变化，Akasofu 曾引入环电流能量增长函数 $R\left(=\frac{dD_{st}}{dt}+\frac{D_{st}}{\tau}\right.$，$\tau$ 为环电流离子生存寿命，不同强度磁暴或同一磁暴的不同发展阶段内，τ 均有较大变化．通常简化取其平均值为 8h$\left.\right)$．R 值突然变负表示环电流能量向电离层的输



(a) 1989 年 3 月 12—15 日特大磁暴 (a strong storm on 12—15 March, 1989)
(b) 1989 年 3 月 29 日中等磁暴 (a moderate storm on 29 March, 1989)

图 1 R、ASY-H 和 AE 的变化

Fig. 1 The variations of R, ASY-H and AE

运。

图 1(a) 给出了 1989 年 3 月 12—15 日特大磁暴期间内 R、ASY-H 和 AE 的变化。从 R 和 ASY-H 两曲线看，尽管具体细节不全相同，但 R 转负时段内 ASY-H 值均较高。在长达三天半期间内，两者间的相关系数达 0.56（负相关）。在 1% 显著性水平下，通过了相关检验[8]。R 与 AE 间也是负相关，但相关系数仅 0.36。AE 与 ASY-H 间的相关程度介于上述二者之间，相关系数为 0.46。

图 1(b) 为 1989 年 3 月 28-29 日期间中等磁暴的情况。同样，各指数间有一些同时出现的峰和谷。AE 与 ASY-H 和 ASY-H 与 R 间的相关系数均比图 1(a)的小，只在 0.4 上下，仅能通过 2% 显著性水平的相关检验。但 R 与 AE 间的相关系数达 0.44，比图 1(a) 事件更大，能在 1% 显著性水平下通过检验。

在全部有 ASY-H 资料的 1989-1991 三年中，ASY-H 与 R 间的相关均与上两典型事件类似。遗憾的是，除 1989 年 3 月外，这三年的 AE 指数尚未整理发表。但我们过去对 AE 与 R 间关系的分析曾表明[2]，总体说在 R 事件（$R < -25$nT/h）发生时，AE 值偏高（600nT 以上），但 R 与 AE 间的相关性并不明显。R 事件中赤道电集流变化则不同。1982-1983 年间磁暴主相前期，反映赤道电集流变化的低纬站 Δz 与 R 间的相关中，有 74% 事例通过显著性检验。全部事例相关系数的平均值达 0.6。

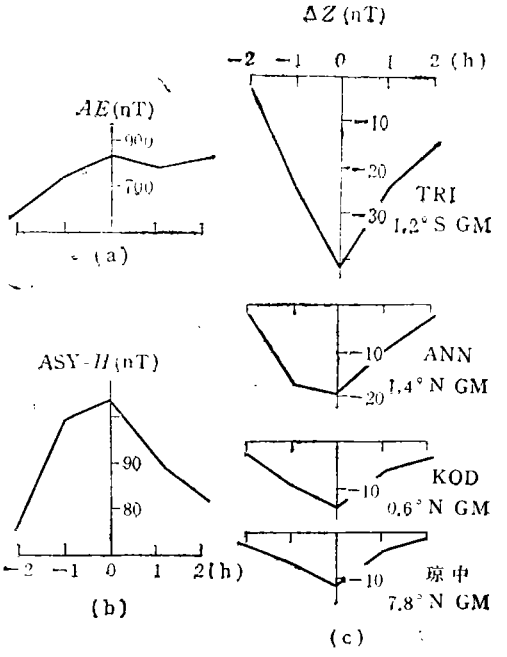
四、磁暴期间赤道区 Δz、极光区 AE 和中纬 ASY-H 指数的不同变化

文献[4,5]中曾系统地阐述了磁扰过程中电离层电流的演化，并将磁层源的电动耦合扰动电流系与热层源动力耦合电流系的效应加以区别。现在，加上中纬地磁指数的应用，更会有助于对此整体物理图象的清晰了解。

首先，用时序叠加法分析有关参数对环电流能量增长的响应。图 2(a)、(b)、(c) 分别给出 AE、ASY-H 和低纬地磁台（印度三站和琼中）Δz 对 R 指数的响应。($\Delta z = z - \bar{z}_q$, $\bar{z}_q$ 是当月 5 个国际磁静日在相应小时上 z 分量的均值)。所取事件都含 $R < -25$nT/h 时刻，且以 R 达最负值作为零时进行时序叠加，每一时序包含 −2h、−1h、0h、+1h、+2h 共 5 个小时。由图 2 可见，各参数的相对变化有很大差异。Δz(+2h) 值仅为 Δz(0h) 的 0.2—0.3；AE(+2h) ≈ AE(0h)；ASY-H(+2h) 约为 ASY-H(0h) 的 0.8，介于 Δz 和 AE 变化之间。

事实上，地磁扰动日可分为两种类型。第一类是发生 R 事件的磁扰日；第二类是无 R 事件的国际磁扰日、以及未被列入国际磁扰日的磁暴恢复相所在日。这两类磁扰日内 Δz 的变化是不同的。图 3(a)、(b) 分别给出 1982 年琼中站 Δz 在此两类扰日内的平均日变化。其主要特征是：R 事件日的 Δz 以负扰为主（图 3(a)），占了从子夜到午后的大部分时段；而无 R 事件的磁扰日内，Δz 以正扰为主（图 3(b)），最强在昏侧。

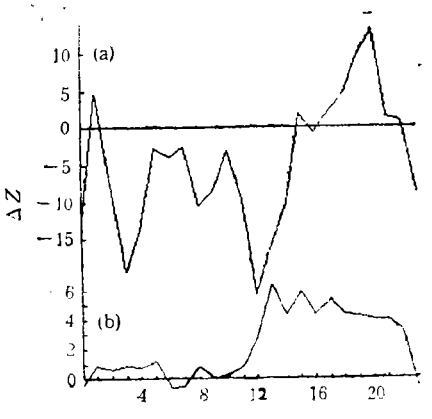
中纬地磁指数均为正值，只能考察其平均值的变化。在 1989—1990 两年内，所有 R 事件时序中 −1h、0h 和 +1h 的 ASY-H 值平均达 100.8nT；上述第一类扰日全天各小时 ASY-H 值总平均为 57nT，第二类扰日的 ASY-H 均值是 35nT；而磁静日内的 ASY-



(a) AE; (b) ASY-H; (c) Δz

图 2 时序叠加分析结果

Fig. 2 The results of superposed epoch analysis (the hour when R reaches extreme negative value is the key hour)



(a) R事件的扰日 (with R events);
(b) 无R事件的扰日 (without R event)

图 3 两类磁扰日内,琼中 Δz 的日变化

Fig 3. The diurnal variation of Δz on magnetic disturbed days

H 均值仅 18nT。 这说明中纬磁扰变化差异很大。 R事件体现了磁层-电离层间有较强耦合,无R事件日的磁扰变化则更多地反映了电离层扰动发电机的效应。

五、物 理 讨 论

以上观测事实可用磁层-电离层耦合的全球图象来概括。我们关于磁层源赤道电集流变化的研究曾表明[6]，磁层-电离层耦合有两个渠道：一是磁层对流电场沿磁力线投射到极区电离层，其作用等效于在极盖区边界上有一驱动电位。磁暴主相初期此电位突增。二是经场向电流的耦合。一区场向电流与驱动电位直接对应；二区场向电流的演化是个弛豫过程，从零值开始指数上升达到饱和值。二区场向电流很小时，磁层耦合的扰动可直接穿透到中低纬电离层，在赤道电集流区闭合。随着二区场向电流的发展，扰动主要地被屏蔽在极光区内。直接穿透使赤道电集流强度（由 Δz 变化体现）在 R 事件时序叠加的 0h 时大大增强。屏蔽后 $|\Delta z|$ 有很大减弱。

模式计算表明[6]，电流强度可减弱到初值的 1/4，这与图 2c 中时序叠加分析结果相近。极光电集流受屏蔽影响较小，在 R 事件 5 小时时序内，AE 指数都比磁静日时高很多，这正是图 2(a) 所示结果。中纬情况与高低纬均不相同。受屏蔽影响后，中纬的扰动变化也减弱。但这里离极光区较近，屏蔽又并非完全绝对，故扰动的减弱要比赤道电集流变化小。图 2(b) 给出的确是此种结果。

图 3 中 Δz 日变化图象说明，在不同类型的扰日和磁扰发展不同阶段内，赤道电集流的日变化特点是不同的。R 事件时 Δz 日变化反映了磁暴初期电动耦合使大部分地方时上的东向电集流增强（Δz 负扰），而无 R 事件的磁扰日内，电离层扰动发电机效应使西向电集流加强（Δz 正扰）。

ASY-H 均值在 R 事件 3 小时内可超过 100nT，这也反映了此时扰动从极光区向低纬的直接穿透。R 事件扰日的 ASY-H 均值大于无 R 事件扰日的均值，则说明电动耦合时的地磁效应要比电离层扰动发电机的作用大。

使用中纬地磁指数的局限性在于：它不能反映磁场位形的具体分布和演化。同时采用非相干雷达的电离层观测，用地磁站链资料分析地磁场时空变化，再配合 ASY-H 指数揭示的规律，将是进一步深入研究的方向。

参 考 文 献

[1] Fejer, B. G. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **84**, p. 5797, 1979.

[2] 资民笏，高玉芬和沈长寿，地球物理学报，第 **31** 卷，第 255 页，1988.

[3] 资民笏和沈长寿，空间科学学报，第 **10** 卷，第 26 页，1990.

[4] 资民笏，严明和沈长寿，地球物理学报，第 **32** 卷，第 489 页，1989.

[5] Zi Min-yun and Shen Chang-shou, *Planet. Space Sci.*, Vol. **34**, p. 353, 1986.

[6] Shen Chang-shou and Zi Min-yun, *Planet. Space Sci.*, Vol. **39**, p. 919, 1991.

[7] Iyemori, T., Mid-latitude Geomagnetic Indices "ASY" and "SYM" for 1989—1991, Kyoto University, Japan, 1992.

[8] 中山大学数学系编写组，概率论及数理统计，人民教育出版社，第 398 页，1981.

THE MAGNETOSPHERE-IONOSPHERE COUPLING AND THE VARIATION OF THE MID-LATITUDE GEOMAGNETIC INDEX

Zi Min-yun

(*The Academy of Arts of China, Beijing* 100009)

Shen Chang-shou

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract

Features of the mid-latitude geomagnetic index ASY-*H* during periods of the magnetosphere-ionosphere coupling are analysed. They are compared with feature of the auroral electrojet (*AE*) index and that of the equatorial electrojet. Both the results of the courrelation analysis and the superposed epoch analysis can be brought into a self consistent physical picture. It is also shown that the diurnal variation of the equatorial electrojet during the main phase of a geomagnetic storm with *R* event is different from that on disturbed days when no energy injects into the ring current. All these results prove that it is important to distinguish the effect of magnetospheric disturbance penetrating directly to mid- and low-latitude from that generated in the ionosphere by dynamic processes.

Key words Magnetosphere-ionosphere coupling, Electrojet mid-latitude geomagnetic index