第16卷 第4期
1996年 10月

空 间 科 学 学 报
CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE

Vol.16, No.4
Oct., 1996

1978 — 1988 年间磁扰的分析与日地耦合*

沈 长 寿
(北京大学地球物理系，100871)

资 民 筠
(中国艺术研究院)

摘 要

用 1978 — 1988 年间行星际磁场(IMF)的 B_Z 分量、极光区 AL 指数和赤道附近地磁台 Z 分量等资料探讨了日地耦合中的主要物理过程. B_Z 的 11 年变化大致与太阳活动程度相当，但 AL 和赤道附近 ΔZ 更多地受磁层和电离层内部过程所控制. 分析中强调了对国际磁扰日按物理过程进行分类的必要性.

关键词 磁扰，国际磁扰日，日地耦合

一、引 言

众多日地耦合研究表明[1—5]，IMF$-B_Z$ 分量突然由北转南时有大量的太阳风能量输入磁层. 初期，扰动能量经极光区电离层可直接穿透到中低纬和赤道地区. 继之，内磁层环电流能量的增长并向电离层释放，建立起了二区场向电流. 此电流把太阳风扰动能量基本上屏蔽在极光区内，而中低纬、赤道区则处于自然恢复阶段.

对以上过程的地磁响应，常用下面几个指数描述. $R=\mathrm{d}(Dst)/\mathrm{d}t+Dst/\tau$ 代表环电流能量的增长率(τ 是环电流质子生存寿命，常用值为 8h)；AL(或 AE) 指数反映极光区电集流变化. 地磁 Z 分量的变化 $\Delta Z=Z-\overline{Z}_q$($\overline{Z}_q$ 是当月国际磁静日的相应均值)大致地刻划赤道电集流的扰动情况[6—8]；A_p(或 K_p)是反映全球总体磁扰水平的指数，其本身无明确的物理意义. 国际磁扰日是依此指数大小在每月中提取扰动相对最大的 5 天. 这样，某月的扰日在另一月中有可能只属地磁活动相对平静的一天，从而各月扰日间缺乏可比性. 因此，在扰日分析时首先须对国际磁扰日进行有物理意义的分类.

由于资料所限，我们以往的工作多限于1982 — 1984 年间，且也不包括对 IMF$-B_Z$ 的考察. 本文探讨了一个太阳活动周期内 IMF$-B_Z$、地磁指数 R、AL 和近赤道三站 ΔZ 的相应变化.

---

* 国家自然科学基金资助课题.
本文于 1995 年 9 月 4 日收到.

二、资料分析

本文讨论的是大尺度的总体性变化，所有资料均为小时值.

1. 扰日分类及赤道电集流变化的地方时效应

首先从 *Dst* 指数计算 11 年中每个国际磁扰日内每小时的 R 值，将出现 $R<-25$ nT/h 的扰日归为 R 事件扰日. 其余扰日中，若有 $Dst<-50$nT 的属非 R 事件磁暴扰日，剩下的称为非磁暴扰日.

对每年的 R 事件扰日，以 R 值最负的小时为 0h(key hour)，取其前后 4 小时(−1h, 0h, 1h 和 2h)的印度 Trivandrum (TRI, 8°29′ N GG) Annamalainagar (ANN, 11°22′ N GG) 和我国琼中(QZ, 19.0° N GG)三站 ΔZ 值各成序列，并按 0h 所在地方时排列后，对每一地方时的各站 ΔZ 分别求均值，即得各站 $\overline{\Delta Z}$ 的日夜分布，以考察此类扰日的赤道电集流变化的地方时效应.

对非 R 事件扰日，则取该天 24 小时的 Z 为序列，分别计算各站每小时 ΔZ 的均值，以考察 $\overline{\Delta Z}$ 的地方时分布.

2. R 事件的周期叠加分析

以上述 R 事件 4 小时序列，对每年事件中相应时间的 B_z、R、AL 和三站 ΔZ 值求出叠加后的平均值，可求得 R 最负值前后的暴时相对变化. R 事件发生的地方时效应则被平均掉了. 此分析中不包括少数非国际磁扰日中的 R 事件.

三、扰日分类的物理意义

上述分类的依据是日地耦合物理过程的基本特性. R 事件中，太阳风扰动能量输入磁层，沿开放磁力线到达极光区电离层(一区场向电流)，并直接穿透到赤道区. 环电流能量向电离层释放，则建立起二区场向电流的屏蔽效应，并使 R 事件的 0h 成了太阳风能量影响电离层极光区和赤道电集流的最强时刻；其后，电离层内部物理过程才更为重要. R 事件经常发生在强磁暴主相初期，称为电动耦合阶段，地磁效应也最强. 非 R 事件磁暴期间的磁扰稍弱些. 非磁暴的国际磁扰日内地磁变化更小. 由于它们往往处于其前一磁暴后期的恢复相，其物理过程以动力耦合为主，即电离层扰动发电机效应成为磁扰的主源.

上述资料分析中，对每年各类扰日 $\overline{\Delta Z}$ (TRI)，$\overline{\Delta Z}$ (ANN) 和 $\overline{\Delta Z}$ (QZ) 日夜分布的结果与文献 [9] 中图 1、2 基本相似，与耦合过程的物理特征大体一致，这里不再复述. 在所分析的 11 年中，各年 $\overline{\Delta Z}$ 的具体分布形态并无确定规律. 这表明它随太阳活动程度变化的关系并不显著. 当然，各年中 R 事件的天数，以及时序 0h 所对应的地方时有很大差异，而且 B_Z 值、R 值与相应 $\overline{\Delta Z}$ 值之间不完全是线性关系，这都会导致各年 $\overline{\Delta Z}$ 日夜分布的随机波动.

值得注意的是，太阳活动高年(1978 — 1982)时 TRI 站的磁倾角为负，而后在 1983—1988 年中变为正值，即 TRI 站位置从偶极磁赤道南侧移到了北侧. 但这 11 年

内 ΔZ(TRI, 0h) 始终为负值，即该站一直处于赤道电集流带中心的北侧. 至于该站与电集流带中心的相对位置是否有变化，变化多大，还有待进一步深入研究.

四、耦合过程的复杂性

以上对日地耦合过程的描述只是很理想化的典型情况. 实际遇到的则是多过程综合体系的全球性复杂现象.

表 1 各年各类扰日 A_p 指数的变化范围和均值

	年		1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
R事件扰日	N(天数)		27	19	12	25	23	16	12	11	9	5	16
	A_p (nT)	最小	23	23	24	23	32	32	34	27	28	18	24
		均值	59.5	50.2	36.8	58.4	76.9	61.9	59.6	49.2	68.7	37.2	56.0
		最大	124	126	79	134	199	143	112	103	202	52	106
非R事件磁暴扰日	N(天数)		29	12	23	19	31	15	20	13	16	18	20
	A_p (nT)	最小	20	22	12	18	23	30	27	32	18	14	18
		均值	36.7	32.2	25.8	31.5	43.9	43.3	51.1	42.7	37.1	31.0	32.1
		最大	70	52	59	62	88	64	112	61	100	46	63
非磁暴扰日	N(天数)		4	29	25	16	6	29	28	36	35	37	24
	A_p (nT)	最小	18	15	11	14	20	20	21	11	11	9	13
		均值	25.3	23.4	21.0	21.2	26.0	30.7	31.5	25.2	19.5	18.5	20.2
		最大	33	39	38	36	35	59	47	46	37	34	27

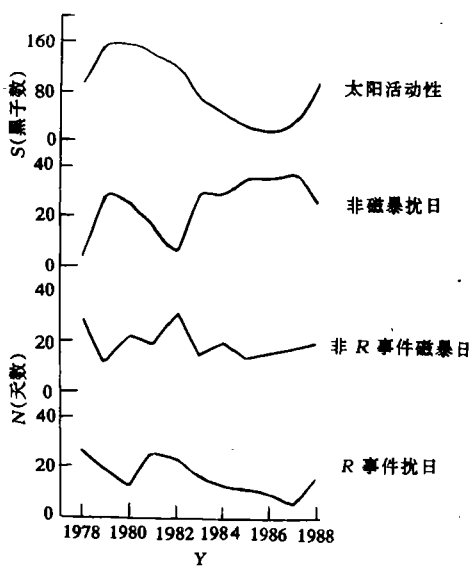


图 1 各年太阳黑子数均值与各类扰日天数
Fig.1 The average value of solar spot number and days for each disturbed type in 1978 — 1988

对 11 年国际磁扰日的 A_p 指数分析(表 1)表明，虽从平均值说 R 事件扰日的 A_p 最大，非磁暴扰日的 A_p 最小，但个别扰日间出现很大的差异. 各类扰日的 A_p 变化范围是相互交叉的. 此现象主要源自各月所选扰日间的强弱有很大差异. 但有时同一月内接连发生的扰日中，也会出现 R 事件扰日的 A_p 值小于其后一天非 R 事件扰日 A_p 值的情况. 这是因为 R 事件前 Dst 常是正值，地磁变化平静，故当天 A_p 值较小. 这是 A_p 日指数时间尺度太长所致.

从 11 年变化看，太阳活动最低年内，太阳风扰动及日地耦合似应弱些，A_p 指数也该小些，但实际不然，1986 年 2 月 8 日为 R 事件扰日，A_p 值高达 202nT，是 11 年中的最大值. R 事件扰日的

A_p年均值也是1986年达极值．非磁暴扰日各年A_p的最小值虽在低年期间偏小，但在1980年也仅为11nT．低年期间常发生比高年更强的全球地磁扰动表明，日地耦合的程度是多因素决定的，磁层、电离层内部过程常起着重要作用．

从R事件日的天数N看，大体上是高年期间N大，低年则偏小，但也非简单的线性关系．与此相应，非磁暴扰日的天数大致地与太阳活动程度相反，1979和1980年属例外．具体关系示于图1.

以上讨论表明，首先，用具物理意义的地磁指数对国际磁扰日作进一步分类是必要的．其次，各物理过程对太阳活动有不同的响应，各过程间的交叉同存等综合结果，使实际现象变得十分复杂．因此，从日地耦合角度看，仍有许多研究有待深入．

五、电动耦合的周期叠加分析

太阳风扰动能量及其向磁层输运引起的环电流能量和极光区电集流变化均与观测点的地方时无明显关联．电导率分布虽能使赤道电集流的磁层源变化在白天比夜间大许多，但其具体分布形态并不确知．下面，暂不考虑地方时差别，对每年内R事件4小时序列的B_Z、R、AL和ΔZ进行周期叠加分析，以观察其暴时变化．最后结果示于图2.

IMF－B_Z观测缺值太多，1984—1988年之间更甚，有时会影响统计结果，但总体说图2中仍有$\overline{R}$事件0h时南向$\overline{B_Z}$最大的事实．这表明环电流能量增长确与太阳风能量输入直接有关．

11年$\overline{B_Z}$变化大致是太阳活动高年期偏大(1978—1981年间均在－10—－14nT之间)，低年较小(约在－6—－10nT间)．表2中给出了R事件0h各参数在各年的均值，空白处为我们暂没收集到资料．$\overline{AL}$逐年变化多数在－600—－800 nT之间，低年期略偏高．这说明太阳风能量进入磁层的机制，以及磁层内部物理过程起着重要作用．对于$\overline{\Delta Z}$的周期叠加结果，除少数年份外，$\overline{\Delta Z}$(TRI)的0h值在－40nT上下，$\overline{\Delta Z}$(ANN)在－15—－20nT之间，而$\overline{\Delta Z}$(QZ)为－8—－11nT；即离赤道愈远，$\overline{\Delta Z}$的变化愈小．它们与逐年$\overline{B_Z}$变化几乎无关，表明电离层内部过程应是赤道电集流变化的主要控制因素．

图2中$\overline{AL}$和$\overline{\Delta Z}$曲线是以R事件0h值为单位的相对(百分)变化．可以看到，多数

表2　太阳黑子数及有关地磁指数的R事件0h值在各年中的均值

年	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
黑子数	92.5	155.4	154.6	140.4	115.9	66.6	45.9	17.9	13.4	29.2	92.8
$\overline{B_z}$	－10.5	－10.6	－13.9	－12.5	－10.0	－5.8	－10.3	－7.7	－10.0	－6.0	－12.7
$\overline{R}$	－41.3	－33.5	－36.9	－48.8	－43.9	－44.2	－34.5	－38.0	－40.2	－27.8	－36.9
$\overline{AL}$	－611	－644	－602	－777	－534	－656	－835	－735	－708	－645	－919
$\overline{\Delta Z}$(TRI)	－38.5	－39.3	－39.5		－43.6	－40.3	－38.1	－39.0	－33.2	－27.6	－28.6
$\overline{\Delta Z}$(ANN)	－15.8	－14.4	－19.7	－19.6	－16.5	－18.1	－14.8	－19.4	－12.7	－14.8	－10.6
$\overline{\Delta Z}$(QZ)					－9.9	－9.9	－8.7	－11.3	－10.2	－3.9	－9.8

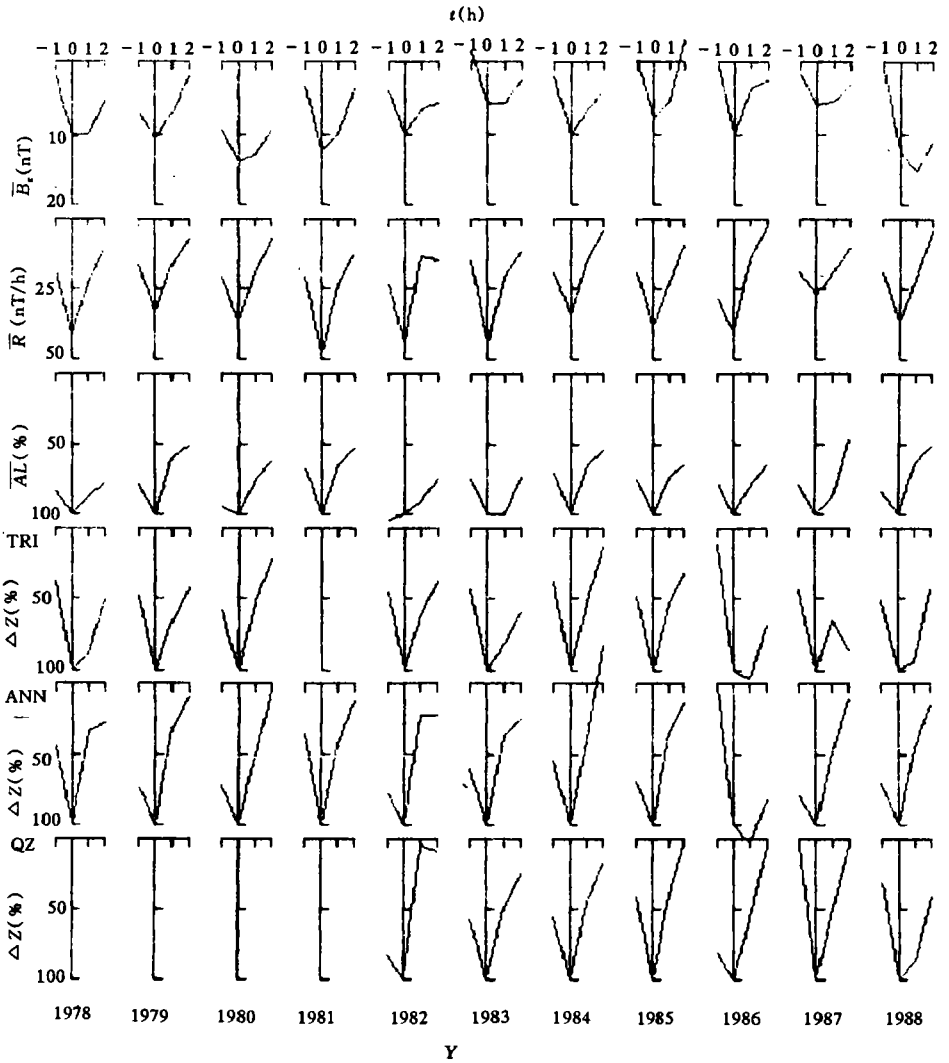


图 2 各年内$\overline{B_z}$、$\overline{R}$、$\overline{AL}$ 和三站$\overline{\Delta Z}$ 的周期叠加分析

Fig.2 The superposed epoch analyses for $\overline{B_z}$、$\overline{R}$、$\overline{AL}$ and $\overline{\Delta Z}$ of 3 stations in 1978 — 1988

情况下$\overline{AL}$(2h) 值为$\overline{AL}$(0h) 值的 50% — 77%. 此两小时内，$\overline{\Delta Z}$(*TRI*) 的相应变化在 22% — 60% 之间(1986, 1987 年例外)，$\overline{\Delta Z}$(ANN) 多在 30% 以下(除 1984 和 1986 二年外)，$\overline{\Delta Z}$(QZ) 则更小(多在 20% 以下，但缺 1978 — 1981 年的记录). 这样的相对变化与前述电动耦合过程特征是相符的. 太阳风扰动能量向电离层释放时，*R* 事件 0h 的极光区和赤道电集流剧增，*AL* 和 Δ*Z* 均达最大值. 随着二区场向电流的建立，随后的扰动能量主要集中在极光区. 这样，|*AL*| 不会有很大下降，能维持到整个扰动电流消失，即 *AL* 值恢复到磁静值需较长时间. 对于赤道附近地区，当扰动受到屏蔽后，已有的扰动场将随电离层内部过程自然地衰减，其变幅要大于 Δ*AL*. 赤道区等效电导率的恢复比中低纬更慢，因此愈靠近赤道(TRI 站)所需复原时间也愈长。

六、小　结

1. 国际磁扰日选取的相对性使各月扰日间失去了可比性，故有物理意义的分类是研究扰日形态及过程的重要前题. R 指数是环电流能量增长及释放的标记，由 Dst 可判断磁暴的发生，依 R 和 Dst 对扰日分类可基本代表扰日物理过程的不同类别.

2. 日地耦合环节多、过程复杂，个别事件中常出现十分异常的现象. 若缺乏详尽观测资料便对其随意解释的作法是不可取的.

3. 本文中 R 事件扰日天数的多少大致与11年太阳活动程度一致；非磁暴扰日天数则反，高年期偏少. 这与高年 IMF$-|\dot{B}_Z|$ 偏大，扰动能量易于进入地球有关，R 事件扰日的 A_p、AL 指数11年变化无确定规律，A_p 极大值(202nT)出现在低年；除个别年外，各站 $\overline{\Delta Z}$ 基本相近(分别为-40、-20和-10nT). 这表明扰动能量的地磁响应中，磁层、电离层内部过程起了重要作用，它不完全由太阳活动这外因所决定.

4. 周期叠加结果表明，极光区和赤道电集流变化与磁层－电离层耦合理论相符. 从统计上说，此过程是经常存在、占主导地位的.

5. 我国琼中站离磁赤道稍远，一般认为它不应受赤道电集流变化影响. 但多年资料分析表明，R 事件中 $\overline{\Delta Z}$(QZ) 变化趋势与赤道站基本同步. 这使我们确信实际影响的存在.

致谢　本文所用资料中，太阳黑子数、Dst 和 A_p 指数取自"SGD"；AL 指数取自WDC－C2发布资料；IMF$-B_Z$取向"Interplanetary Medium Data Supplement 2－5"，由 Joseph H. King 提供；三站地磁 Z 分量由国家地震局地球物理研究所高玉芬同志提供，谨表感谢.

参　考　文　献

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

[2] Kamide, Y. and Matsushita, S., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.**43**, P.411, 1981.

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

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

[5] Shen Chang－shou and Zi Min－yun, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol.**55**, p.1681, 1993.

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

[7] 沈长寿和资民筠，地球物理学报，第**33**卷，第512页，1990.

[8] 资民筠和沈长寿，空间科学学报，第**15**卷，第47页，1995.

[9] 沈长寿和资民筠，地球物理学报，第**39**卷，第306页，1996.

MAGNETIC DISTURBANCE DURING 1978 — 1988 AND THE SOLAR-TERRESTRIAL COUPLING

Shen Chang-shou

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

Zi Min-yun

(*The Academy of Arts of China*)

Abstract

The data of IMF-B_Z, auroral electrojet indices AL and ΔZ (the deviation of Z-component from geomagnetic quiet condition) near the equator during 1978—1988 are analyzed to discuss the solar-terrestrial coupling process. The results show that the 11-yearly variation of B_Z is roughly corresponding to that of solar cycle activity. The variation of AL and ΔZ, however, are different. They are mainly controlled by physical processes in the magnetosphere and ionosphere.

The international magnetic disturbed day (IMDD), chosen according to the A_p or K_p index, can represent the average level of the geomagnetic disturbance. The physical meaning of these indices, however, is unclear. The disturbance level, the global feature presented and the physical process involved of IMDD from each month are different greatly. So, a new reasonable classification according to physical process is needed in futher study.

Key words Geomagnetic disturbance, International magnetic disturbed day, Solar-terrestrial coupling