第7卷 第4期 空间科学学报 Vol. 7, No. 4
1987年10月 GHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1987

宇宙线强度变化与磁扰 K 类型

叶 宗 海
（中国科学院空间物理研究所）
卢 钦 棠
（中国科学技术大学地球和空间科学系）
宗 秋 刚
（中国科学院空间物理研究所）

摘 要

本文把1966—1983年期间发生的679个地磁暴进行了分类，利用统计方法分析了各类磁暴发生前后宇宙线强度的变化特征．突发急始脉冲发生后，宇宙线强度没有出现显著的变化；缓始型暴发生后，宇宙线强度出现 Forbush 下降，但下降幅度很小；急始型暴发生后，宇宙线强度出现十分明显的 Forbush 下降． 当把急始型暴按 K 指数大小和持续时间分为5种类型，发现它们伴随的宇宙线 Forbush 下降是不一样的，其下降幅度随磁暴的增强而加大， 下降的速率随磁暴的增强而加快，扰动的持续时间随磁暴的减弱而增加．

一、引 言

地磁暴和宇宙线强度变化是两种不同的现象，但地磁场的变化直接影响地球上记录的宇宙线强度变化，因此，二者之间存在一定的联系．Kitamura[1]曾把磁暴分为急始型和缓始型，研究它们与宇宙线强度变化的关系，发现急始型暴有52% 会伴随宇宙线的Forbush下降，而缓始型暴不会有宇宙线的 Forbush 下降伴随． 多尔曼[2]指出，当磁暴按塔什干目录分类，发现出现 Forbush 下降幅度超过1% 的事件时，大都有大的和极大的磁暴发生．Yoshida 等人发现[3]，Forbush 下降与地磁脉动有关，当有很强的地磁脉动出现时，有较大的 Forbush 下降发生． 另一些学者把 Forbush 下降和太阳及行星际磁场的一些参数紧密地联系起来，例如 Lockwood[4] 发现 Forbush 下降幅度与太阳耀斑在太阳上的位置有关；Aldagarova[5] 发现 Forbush 下降的速率随冲击波速度的增加而加快；Takashi 等人[6]发现 Forbush 下降的幅度是太阳风速和行星际磁场的函数．

从上面的工作可以看出，关于磁暴期间宇宙线强度的变化已经得到许多重要的结果，但这些工作都没有对磁暴作过详细分类，也没有从大量事件的统计上进行过分析．本文的工作是把急始磁暴进行更细的分类，通过大量事件从统计角度分析不同类型磁暴时宇

本文于1987年1月5日收到．

宙线强度变化的特征.

二、磁暴分类和资料处理

首先把磁暴分为 S_C（急始型）、G_C（缓始型）和 S_I（突发急始脉冲型）三大类型，并根据 K 指数大小和磁扰的持续时间（即时段），又把 S_c 暴分为五种类型[7]：1. S_A 型（强烈磁暴）：$K \geqslant 8$；2. S_B 型（强磁暴）：$K \geqslant 6$；3. S_D 型（中等扰动）：$K \simeq 5$，时段$\geqslant 4$；4. S_d 型（弱扰动）：$K \geqslant 4$，时段$\leqslant 4$；5. S_b 型（小磁暴）：$Kp \geqslant 6$，时段$\leqslant 2$.

地磁暴资料取自朱岗崑等编的“磁暴目录及日地物理基本资料”* 和地震局地震台出版的磁暴报告**. 把 1966—1983 年期间所发生的 679 个磁暴按上述类型分类，其数目分布见表 1. 宇宙线强度变化资料取自 S. G. D. 1966—1983 年所载的 Deep River 台站的超中子堆资料[8].

表 1　磁暴类型与数目分布

类型	S_C						G_C	S_I	总　计
	S_A	S_B	S_D	S_d	S_b	合　计			
数目	20	160	43	62	27	312	306	61	679

统计分析方法采用时间迭加法，以磁暴发生的当天作为零天，统计零天之前 3 天至后 9 天的宇宙线强度变化. 在本文的图 1—5 中，横坐标是时间，以天为单位；纵坐标是宇宙线强度，其真实值应乘以 300；图中水平直线是宇宙线强度的总体平均值；虚线是表征统计置信度的 0.05 显著性水平，它是按学生式 t 分布计算的，即 $\bar{x}_n \pm t\sigma/\sqrt{n-1}$. 式中 $\bar{x}_n$ 为宇宙线强度 n 个样本数的总体平均值，σ 为标准偏差，随机变量 t 遵循学生式 t 分布；图中 N 表示磁暴事件数目；百分比数值是把零天之前的三天宇宙线强度作为平均值时，宇宙线强度下降的最大百分数.

三、分 析 结 果

1. 所有磁暴

先不将磁暴分类，看所有磁暴发生时宇宙线强度变化的总趋势. 对 1966—1983 年间的 679 个磁暴前后宇宙线强度变化的分析结果在图 1 中给出. 可以看到，当磁暴发生后，宇宙线强度出现明显下降，在磁暴后第 2 天宇宙线强度达到最小值，其下降的最大幅度大约 0.9%，然后缓慢恢复，第 6 天达到平均值水平，第 8 天基本恢复到暴前水平. 尽管下降幅度不大，但宇宙线强度变化明显地超过了 0.05 的显著性水平，具有较高的统计精度，这说明宇宙线强度变化和磁暴是有一定联系的.

* 朱岗崑主编，磁暴目录及日地物理基本资料，中国科学院地球物理研究所，1982 年.

** 国家地震局地球物理研究所编，磁暴报告，1979—1983 年.

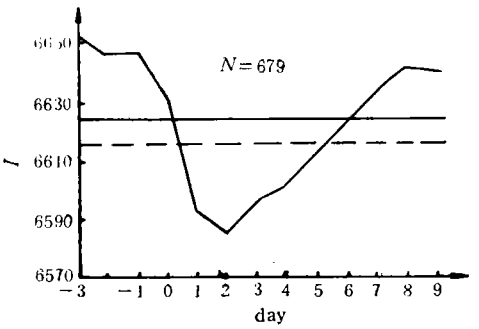


图 1 所有磁暴时宇宙线的强度变化

Fig. 1 The variation of cosmic ray intensity during all magnetic storms

2. S_c、G_c 和 S_I 暴

当把磁暴按 S_c、G_c 和 S_I 分类时，其宇宙线强度的变化如图 2 所示. 从图中可以看出，当 S_c 暴发生时，宇宙线强度出现明显的 Forbush 下降，在磁暴发生的当天，宇宙线强度开始下降，到第 2 天达到最小值，最大下降幅度约 1.8%，然后缓慢恢复，如图 2(a) 所示.

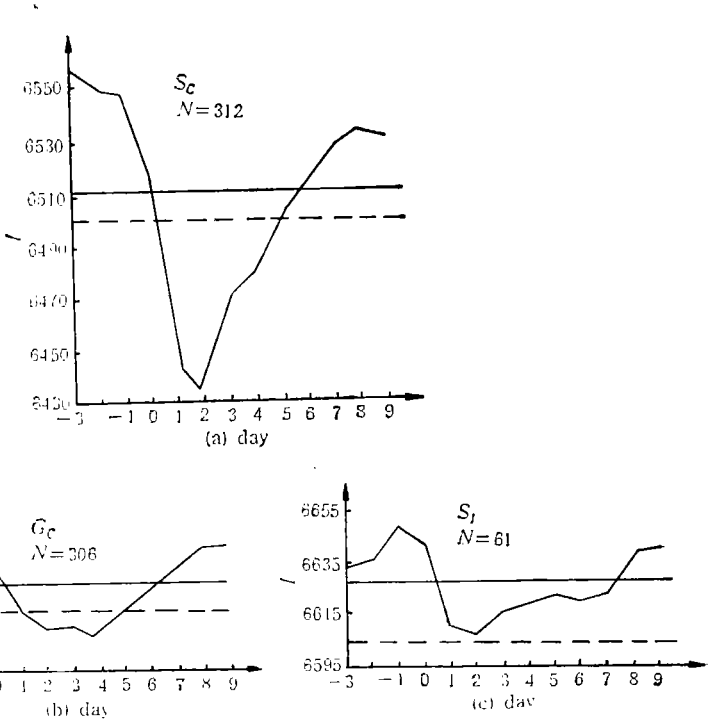


图 2 在 S_C、G_C 和 S_I 暴期间宇宙线强度的变化

Fig. 2 The variation of cosmic ray intensity during S_C、G_C and S_I storms

G_C 暴是只有主相而无急始的一种磁暴，当这种磁暴发生时，宇宙线强度变化如图 2(b) 所示. 可以看到，宇宙线强度存在下降，但下降幅度很小，最大只有 0.4%. 尽管如

此，由于样本数较多，统计精度较高，最大下降仍然明显地超过了置信线．这说明 G_C 暴期间宇宙线强度也存在 Forbush 下降．但是，与 S_C 暴相比，G_C 暴期间的宇宙线强度下降幅度要小得多．G_C 暴发生第 4 天宇宙线强度才达到最小值，在最小值附近扰动的持续时间也较长，这说明 G_C 暴期间宇宙线强度的下降速率和恢复速率都比 S_C 暴时宇宙线强度的下降速率和恢复速率慢．

S_I 暴只是突发性急始脉冲，当它发生时，宇宙线强度的变化如图 2(c) 所示．从统计结果看出，宇宙线强度虽有下降现象，但下降幅度很小，而且最大下降幅度没有超过置信线，因此，我们认为在 S_I 暴期间基本上不存在宇宙线的 Forbush 下降．

3. S_A、S_B、S_D、S_d 和 S_b 暴

S_A 暴是强烈磁暴，当这种磁暴发生时，宇宙线强度出现十分明显的 Forbush 下降．其下降速率很快，在磁暴发生后的第 1 天就达到了最小值；它的下降幅度很大，最大值约 4.3%；恢复速率也快，磁暴后第 5 天宇宙线强度就达到平均值水平，整个扰动持续时间较短，参看图 3(a)．

S_B 暴是强磁暴，当这种磁暴发生时，宇宙线强度也出现明显的 Forbush 下降．在磁暴后的第 2 天下降到最小值，最大下降幅度约为 1.7%，在磁暴后的第 5 天恢复到平均值水平，见图 3(b)．与 S_A 暴相比，S_B 暴期间宇宙线出现的 Forbush 下降，其下降速率要慢一些，最大下降的幅度也小很多．

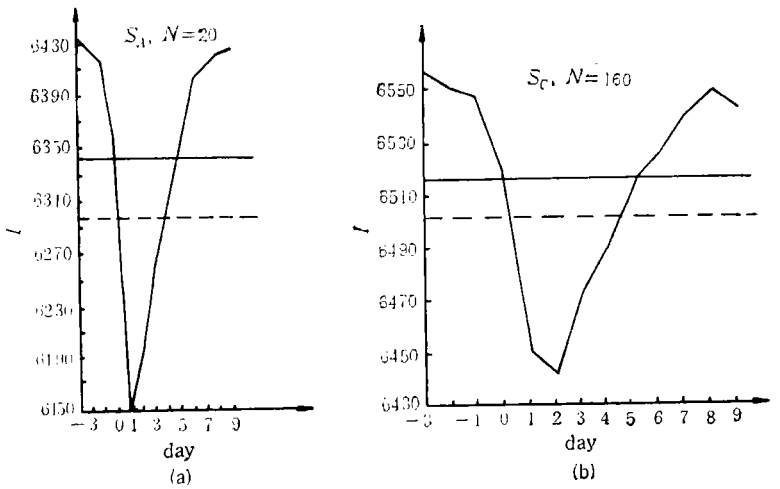


图 3　S_A 和 S_B 暴期间宇宙线的强度变化

Fig.3 The variation of cosmic ray intensity during S_A and S_B storms

当中等扰动 S_D 型磁暴发生时，宇宙线强度的变化如图 4(a) 所示．可以看到，在 S_D 暴发生后宇宙线强度也出现 Forbush 下降，在磁暴后第 2 天达到下降的最小值，最大下降幅度为 1.2%，在最小值附近的扰动时间较长，在磁暴后第 6 天还未恢复到平均值水平．和 S_B 暴相比，S_D 暴期间宇宙线 Forbush 下降的最大下降幅度要小很多，恢复也慢许多．

S_d 暴是弱扰动磁暴，持续时间比较短．当这种磁暴发生时，宇宙线强度变化如图 4(b)

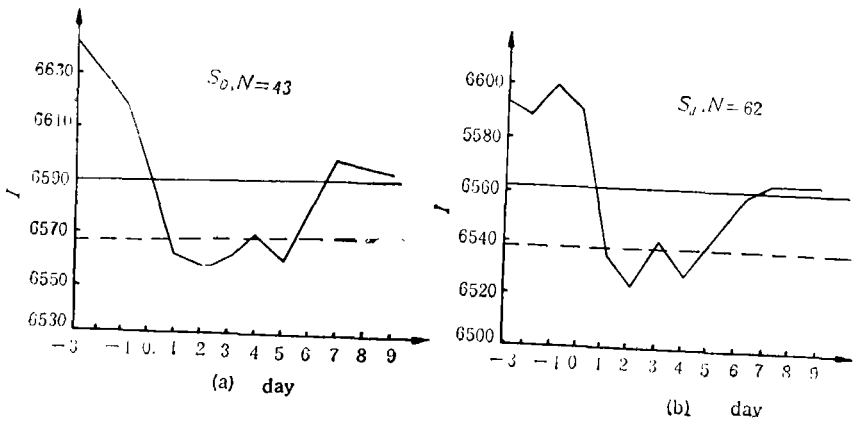


图 4 S_D 和 S_d 暴期间宇宙线的强度变化

Fig. 4 The variation of cosmic ray intensity during S_D and S_d storms

所示. 可以看到,宇宙线也出现 Forbush 下降,在磁暴后第 2 天强度下降到最小值,最大下降幅度约为 1.1%, 在最小值附近的扰动时间较长,磁暴后的第 7 天宇宙线强度才恢复到平均值水平. 这些特征和 S_D 暴期间宇宙线出现的 Forbush 下降特征十分相似.

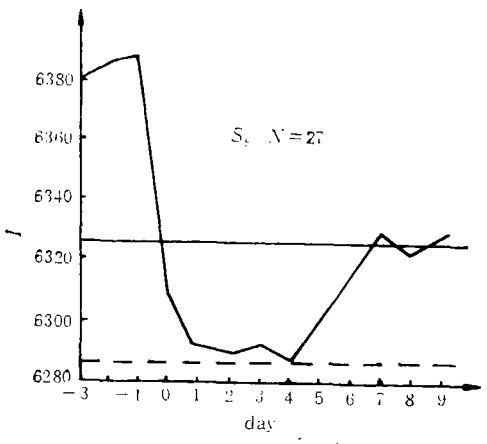


图 5 S_b 暴期间宇宙线的强度变化

Fig. 5 The variation of cosmic ray intensity during S_b storms

S_b 暴是小磁暴,扰动的持续时间很短,当这种磁暴出现时, 宇宙线强度的变化如图 5 所示. 我们看到 S_b 暴发生后,宇宙线强度虽有下降, 但宇宙线强度的最小值并没有超过 0.05 显著性水平的置信线. 因此, 我们认为 S_b 暴期间基本上不存在宇宙线的 Forbush 下降.

从以上的分析可以看到,在 S_A、S_B、S_D、S_d 和 S_b 5 种类型的磁暴期间宇宙线的强度变化是有很大差异的.为了相互比较,现把这几类磁暴期间宇宙线强度变化的主要特征列于表 2. 从表中可以看出,在 S_A、S_B、S_D 和 S_d 期间宇宙线 Forbush 下降的幅度依次减小,这表明,磁暴越强,则 Forbush 下降的幅度越大; S_A 和 S_B 暴期间宇宙线强度恢复到平均值的时间比在 S_D 和 S_d 暴期间要短, S_A 暴时宇宙线强度下降到最小值的时间也比其它暴快一天,这说明宇宙线强度的下降速率随磁暴的增强而加快,恢复速率随磁暴的减弱而变慢.

4. Forbush 下降的速率与持续时间

由于上面的统计分析数据使用的都是日平均值,所以,各类磁暴期间 Forbush 下降的下降速率和恢复速率之间的差异并不能十分清楚地显现出来. 为了进一步说明这一问题,我们以每小时的宇宙线强度变化资料分析这几类事件,而每类事件只选出一个事件作

表 2　S_A、S_B、S_D、S_d 和 S_b 暴期间宇宙线强度变化的特征

磁暴类型	Forbush 下降	Forbush 下降的特征		
		下降到最小值的时间	最大下降幅度	恢复到平均值的时间
S_A	有	1 天	4.3%	5 天
S_B	有	2 天	1.7%	5 天
S_D	有	2 天	1.2%	7 天
S_d	有	2 天	1.1%	7 天
S_b	无	—	—	—

代表，看它们的特征是否与统计分析结果一致．我们选取 S_A 暴对应的 Forbush 下降事件是 1972 年 8 月 4 日事件，1969. 3. 23、1966. 9. 14、1970. 6. 1 和 1974. 6.25 事件分别代表 S_B、S_D、S_d 和 S_b 暴所对应的宇宙线强变化，这些事件的每小时宇宙线强度变化如图 6 所示．

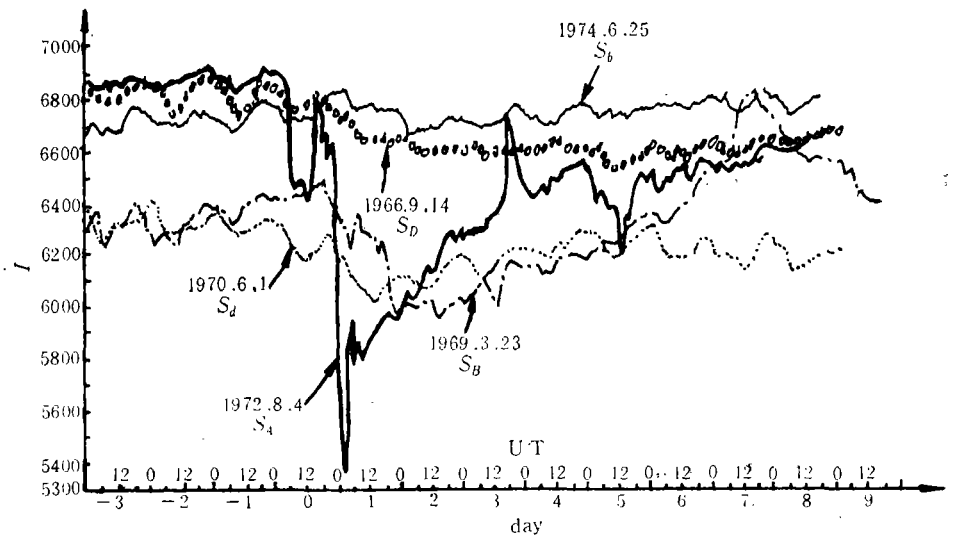


图 6　在 S_A、S_B、S_D、S_d 和 S_b 暴期间宇宙线强度的时均值变化

Fig. 6　The hourly variation of cosmic ray intensity during S_A、S_B、S_D、S_d and S_b storms

由图 6 可以看到，1972 年 8 月 4 日事件 (S_A) 从 4 日 3 时开始下降，到 5 日 2 时达到下降的极大值，所需时间为 23 小时，最大下降幅度约 22%，最大扰动持续时间较短，恢复很快，于 8 月 7 日又出现了一个新的事件．1969 年 3 月 23 日事件 (S_B) 从 23 日 21 点开始下降，到 25 日 15 时下降到最小值，共 42 小时，下降的最大幅度约 8.2%，其恢复速率要比 S_A 慢得多．1969 年 9 月 14 日事件 (S_D) 从 14 日 2 时开始下降，于 16 日 6 时下降到极小值，共 52 小时，下降的最大幅度约 4.7%，其恢复速率比 S_B 时还慢．1970 年 6 月 1 日事件(S_d)与 S_D 事件差不多，下降到最小值时间约 53 小时，最大下降幅度约 4.7%，持续时间也与 S_D 事件相近．1974 年 6 月 25 日事件 (S_b) 是小磁暴，这期间宇宙线强度的变化不十分明显．从每小时数据分析看，其变化特征与统计分析结果一致，即：S_A、S_B、S_D、S_d 和 S_b 事件期间宇宙线强度的下降幅度随磁暴的减弱而减小，下降速率和恢复速率

随磁暴的增强而加快，单个事件的分析结果比统计结果更为清楚.

四、基 本 结 论

根据上面的分析，可以得出以下几点结论:

1. 宇宙线强度变化与磁暴是有一定联系的，但不同类型的磁暴对宇宙线强度的影响是有很大差异的. S_c 暴期间明显地出现宇宙线 Forbush 下降; G_c 暴期间虽然也存在宇宙线 Forbush 下降，但下降幅度比 S_c 暴时小得多; S_I 暴期间不存在宇宙线的 Forbush 下降. 这表明宇宙线的 Forbush 下降主要是由行星际冲击波产生的，太阳风高速流也对宇宙线强度有调制作用，但远小于冲击波的作用.

2. 对 S_c 暴分类统计分析表明，宇宙线 Forbush 下降的特征和磁扰 K 指数大小及扰动时间长短有关，磁扰 K 指数越大，扰动时间越长，则宇宙线 Forbush 下降的幅度越大，下降速率和恢复速率也越快.

3. 根据章公亮等同志的工作知道[9]，磁扰 K 类型与行星际磁场强度和太阳风速度之间有很好的对应关系，即 S_A、S_B、S_D、S_d 和 S_b 的发生是与行星际磁场和太阳风速的增加幅度依次减小而对应的. 联系到磁扰 K 类型与 Forbush 下降之间的对应关系，可以得出结论: 宇宙线 Forbush 下降和行星际磁场强度、太阳风速度有明显的对应关系，即行星际磁场强度和太阳风速度越高，则宇宙线 Forbush 下降的最大幅度越大，其下降速率和恢复速率也越快. 这一结果与宇宙线强度同行星际扰动参量的直接相关分析基本一致.

4. 小磁暴期间宇宙线强度不会出现明显的 Forbush 下降.

五、讨 论

在本文的统计分析中宇宙线强度的资料采用的是日平均值，如果采用时均值进行分析，则 Forbush 下降的下降速率和恢复速率会表现得更清楚一些. 由于缺少 Deep River 站 1978—1983 年期间时均值资料，所以采用了日均值进行统计分析. 为了弥补这一缺欠，我们对每一种 S_c 暴，选用单个事件的时均值变化，来进一步说明宇宙线强度的变化特征.

上面的分析结果是通过大量事件得到的统计平均特性，对于每一个具体的事件宇宙线的强度变化不一定和我们得到的结果完全吻合.

本文得到的宇宙线 Forbush 下降与行星际磁场强度及太阳风速度大小具有对应关系，这只是一个统计的定性结果，仅是从 Forbush 下降与磁扰 K 指数类型关系的一个侧面反映了 Forbush 下降与行星际介质扰动的关系. 究竟 Forbush 下降与行星际磁场强度和太阳风速有什么样的定量关系？它还与行星际介质的其它参量有什么关系？比如有人提到与等离子体的数密度有关，这些问题有待进一步的研究.

致谢: 在资料收集中得到了朱邦耀同志和高玉芬同志的热情帮助，在此表示衷心感谢.

参 考 文 献

[1] Kitamura, M., *Reports Ionospheric Research Japan*, Vol. 8, p. 145, 1954.

[2] Л. И. 多尔曼，宇宙线强度变化(朱岗崑等译)，科学出版社，第 207 页，1965.

[3] Yoshida, S. et al., *Planet. Space Sci.*, Vol. **14**, p. 979, 1966.

[4] Lockwood, J. A., *Space Sci. Rev.*, Vol. **12**, p. 658, 1971.

[5] Aldagarova, H. Z. et al., 13th International Cosmic Ray Conference Papers, Vol. 2, p. 1227, 1973.

[6] Takashi, M. et al., 16th International Cosmic Ray Conference Papers, Vol. 3, p. 416, 1979.

[7] 章公亮等，地球物理学报，第 **25** 卷，第 10 页，1982.

[8] Solar Geophysical Data, Prompt Reports, National Geophysical and Solar-Terrestrial Data Center, Boulder, 1966—1983.

[9] 章公亮等，地震地磁观测与研究，第 **4** 卷，第 1 页，1983.

The Variations of Galactic Cosmic Ray Intensity and the *K* Category of Magnetic Disturbances

Ye Zong-hai

(Institute of Space Physics, Academia Sinica)

Lu Xing-tang

(University of Science and Technology of China)

Zong Qiu-gang

(Institute of Space Physics, Academia Sinica)

Abstract

The relationship between the variations of galactic cosmic ray intensity and geomagnetic storms from 1966 to 1983 is studied in this paper. The variations of the cosmic ray intensity during a sudden commencement pulse Si doesn't show an obvious decrease. A very small Forbush decrease appears during gradual commencement storm G_C. On the other hand, there is a very obvious Forbush decrease during sudden commencement storm S_C. Then S_C storms are classified into S_A, S_B, S_D, S_d and S_b storms on the basis of K index. The results of analysis show that Forbush decrease of cosmic ray intensity during S_A storms is the most obvious and the decreasing rate and recovering rate are also the fastest. The amplitutes of Forbush decrease are descending in the order of S_A, S_B S_D and S_d storms. Their decreasing rates and recovering rates become slowing in the same order. But the cosmic ray intensity during S_b storms has no obvious decrease. According to corresponding relationship between K category of magnetic disturbances and interplanetary disturbances, a relation between cosmic ray intensity variations and interplanetary disturbances is obtained.