

2000年4月6日磁暴夜侧场向电流变化特征

王源^{①②}, 洪明华^{①*}, 陈耿雄^①, 徐文耀^①, 杜爱民^{①③}, 赵旭东^{①②}, 刘晓灿^④, 罗浩^{①②}

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 中国科学院空间科学与应用研究中心, 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

④ 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

* 联系人, E-mail: mhhong@mail.igcas.ac.cn

2009-11-27 收稿, 2010-02-26 接受

国家重点基础研究发展计划(2006CB806305)、国家自然科学基金(40874088, 40890163)、公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY200806072)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(058904)资助项目

摘要 利用全球地磁台站观测数据, 研究了2000年4月6日超级磁暴期间北半球夜侧场向电流变化特征. 结果表明, 磁暴主相期间, 北半球夜侧中纬地区呈现东向磁扰的主要特征, 子夜后扇区东向磁扰强于子夜前扇区. 这表明夜侧高纬电离层的场向电流以流出电离层为主, 流出电离层的场向电流中心在子夜后扇区, 靠近子夜, 即II区场向电流和部分环电流体系在磁暴主相期间向昏侧偏转. 磁层亚暴对夜侧流出电离层的场向电流有一个先减弱后增强的效应. 磁暴主相期间部分环电流和II区场向电流的发展与子夜后-晨侧扇区的西向电集流增强相对应.

关键词

磁暴主相
场向电流
极光电流
亚暴电流楔

场向电流是地球近地空间重要的电流体系, 是太阳风-磁层-电离层耦合的重要通道. 由太阳活动引起的行星际扰动传播到地球, 将与弓激波和磁层顶相互作用, 由此产生的场向电流可在高纬区产生磁脉冲事件^[1-3], 并且引起中低纬度地磁场的变化^[4]. 另外, 高纬电离层还分布着晨侧流入电离层、昏侧流出电离层的I区场向电流以及流向相反的II区场向电流. 其中, I区场向电流连通到磁尾等离子体片以及磁层边界层, II区场向电流与部分环电流和极区电离层电流形成闭合回路^[5]. 磁暴发生时, 伴随着对称环电流和部分环电流的增强, II区场向电流也随之增强^[6]. 而当亚暴发生时, 随着亚暴膨胀相的开始, 越尾电流中断产生的场向电流与高纬电离层子夜扇区附近西向电集流构成回路, 形成了亚暴电流楔^[7]. 磁层-电离层通过场向电流的耦合过程使得磁层能量不断地向电离层输入, 同时, 电离层的变化反馈到磁层, 对发生在磁层中的动力学过程产生重要的影响. 因此, 连接磁层-电离层的场向电流与粒子沉降、电

场映射等一系列耦合现象密切相关, 是太阳风-磁层-电离层相互耦合的关键问题.

卫星的发展使我们可以获得直接的空间观测资料, 但卫星的轨道限制了观测点的分布, 其数据所反映的空间、时间有限. 地磁台站的广泛分布与连续观测弥补了这一不足. 虽然地面磁场记录很难将环电流和部分环电流的效应分离开来, 但由于夜侧中纬地区电离层电导率很弱, 电离层中的电流不足以产生显著地磁扰动^[8], 而沿磁力线流动的场向电流将导致该区域地磁场东西分量的变化, 流出电离层的场向电流产生东向磁扰, 流入电离层的场向电流产生西向磁扰^[9], 因此夜侧中纬地区地磁场东西分量扰动主要由场向电流引起. 地磁平静时期, 场向电流较弱; 地磁扰动期间, II区场向电流与I区场向电流总强度相当, 夜间II区场向电流密度接近I区场向电流密度^[10]. 由于II区场向电流分布在距地球4~9 R_E 区域, 而I区场向电流在尾向15 R_E 以外, 磁暴期间II区场向电流在夜侧中纬地区引起的磁扰更为显著,

这为我们利用地磁数据研究磁暴/亚暴期间 II 区场向电流和部分环电流系统的变化特征提供了可能性。

近来,一类强扰动事件引起国内外研究者的关注^[11-13],即 $Dst < -250$ nT 的磁暴,这类事件被称为“超级磁暴”。研究者在对这一类强扰动事件进行研究时发现,磁层-电离层耦合系统会出现偏离目前模型所预测的情况,例如 Hairston(2005年)^[11]对 2003年 10~11月超级磁暴的研究发现,极盖电势降在 260 kV 达到饱和,超出了 Hill-Siscoe 模型给出的 160~250 kV 的范围。虽然超级磁暴事件相对较少,但研究这一类事件对于完善和发展理论和预报模型是很有必要的。目前对暴时环电流分布的研究存在着一些争议,一些研究表明磁暴主相期间,环电流呈现明显的晨昏不对称,最强处分布在昏侧^[14];另外一些模拟研究的结果则显示,在磁暴主相期间,环电流的大部分粒子集中在夜侧^[15]; Brandt(2002年)^[16]的研究还发现,在强 IMF B_y 作用下,暴时环电流粒子峰值向晨侧偏转。此外,亚暴对环电流的效应也一直是备受关注的问题,以前的研究曾经认为磁暴是一系列亚暴的总和^[17],但近来有研究表明亚暴的发展会减弱环电流^[18]。针对这些问题,本文结合卫星与地面磁场观测资料,研究了 2000年 4月 6~7日磁暴期间夜晚侧磁场变化特征,着重分析了与“直接驱动”过程相关和与亚暴电流楔相关的场向电流及其分布在这一超级磁暴期间的演变过程,对 II 区场向电流和部分环电流系统的变化特征以及亚暴电流楔的效应进行讨论。本文还结合高纬地磁台站数据,对场向电流与极光电流之间的关系进行了分析。

1 数据及分析方法

本文所选用的地磁数据分别来自国际地磁台网 (InterMagNet)、IMAGE 台链和 Alaska 台链。由于不同区域的地磁扰动反映不同空间电流系的贡献,因此在研究夜侧场向电流对地磁场扰动贡献时,选择地磁纬度低于 50° 的中纬台站东西分量(Y)观测资料,以避免高纬电离层电流影响。而在研究高纬电离层极光电流的贡献时,考虑到强磁扰期间极光电流向低纬迁移,其电流中心可能超出 AE 指数观测台站所处的纬度范围^[19,20],因此选择地磁纬度位于 $55^\circ \sim 70^\circ$ 之间的高纬台站南北分量(X)观测资料。有关的台站信息如表 1 和表 2 所示。

对中纬台站 Y 分量数据,我们进行如下几步处理:

表 1 中纬台站

台站	地理纬度 / $(^\circ)$	地理经度 / $(^\circ)$	地磁纬度 / $(^\circ)$	地磁经度 / $(^\circ)$	标准差 /nT	MLT 子夜对应 UT
IRT	52.2	104.5	47.47	177.31	11.51	17:07
FUR	48.3	11.3	43.51	86.92	15.71	22:26
CLF	48.0	2.3	43.04	79.35	15.70	23:01
HRB	47.9	18.2	43.04	92.78	15.36	22:01
NCK	47.6	16.7	42.67	91.4	14.24	22:07
MMB	43.9	144.2	37.07	215.49	7.62	14:53
FRD	38.2	282.6	49.15	357.76	11.45	05:05
FRN	37.1	240.3	43.00	303.55	8.95	08:28
BSL	30.4	270.4	41.39	340.43	9.93	06:04
GUI	28.3	343.6	14.15	60.68	9.59	00:29
EYR	-43.4	172.4	-50.07	256.4	15.92	11:10
AMS	-37.8	77.6	-49.16	138.64	10.59	20:04
CNB	-35.3	149.0	-45.47	226.37	13.11	13:22

表 2 高纬台站

台站	地理纬度 / $(^\circ)$	地理经度 / $(^\circ)$	地磁纬度 / $(^\circ)$	地磁经度 / $(^\circ)$	MLT 子夜对应 UT
BRW	71.30	203.25	70.02	251.16	12:12
YKC	62.47	245.53	69.50	300.48	08:29
FCC	58.80	265.90	68.96	332.22	06:34
AND	69.30	16.03	66.44	100.45	21:32
KEV	69.76	27.01	66.32	109.32	20:56
NAQ	61.20	314.60	66.22	43.46	02:08
MAS	69.46	23.70	66.17	106.49	21:07
KIL	69.02	20.79	65.87	103.87	21:18
PBQ	55.30	282.25	65.73	358.70	05:04
LEK	68.13	13.54	65.40	97.57	21:45
ABK	68.36	18.82	65.31	101.84	21:26
CMO	64.80	212.17	64.97	264.03	11:10
MUO	68.02	23.53	64.72	105.29	21:12
KIR	67.84	20.42	64.69	102.71	21:22
LOZ	67.97	35.08	64.22	114.55	20:35
SOD	67.4	26.6	63.95	107.32	21:03
PEL	66.90	24.08	63.55	104.99	21:13
GAK	62.41	214.84	63.06	267.93	10:52
RVK	64.94	10.98	62.24	93.37	22:02
LYC	64.61	18.75	61.44	99.34	21:36
OUJ	64.52	27.23	60.99	106.19	21:08
DOB	62.07	9.11	59.30	90.25	22:16
HAN	62.30	26.65	58.72	104.66	21:14
LER	60.14	358.82	57.98	81.09	22:58
NUR	60.5	24.6	56.90	102.18	21:24
UPS	59.12	5.24	56.44	85.74	22:35

- (1) 对当月国际磁静日的地磁数据进行傅里叶变换,以前 12 阶模之和作为太阳静日变化(S_q),然后从原始数据中减去 S_q 变化,得到东西方向的磁扰数据(ΔY).
- (2) 考虑到场向电流在中纬地区造成的地磁扰动具有纬度效应^[21,22],为了在描述场向电流沿磁地方时 (MLT) 的分布时消除纬度效应,对每个台站 ΔY 进行归一化处理. 方法如下: 以 1999 和 2000 两年观测资料 2100~0300 MLT 数据的标准差(SD)为基准,对此

次事件的数据, 先除以标准差再乘以 10(即 $\Delta Y/SD \times 10$). (3) 为了弥补观测点的不足, 我们选用了部分南半球台站数据, 按照通常作法, 假设在春秋分南北半球场向电流对称, 将南半球的数据反符号对应到北半球.

对高纬台站 X 分量数据, 首先消除 S_q 变化, 然后按照世界时把各台站的变化曲线重叠地画在一起, 取这些曲线的下包络为西向电集流的变化特征. 考虑到对流驱动的西向电集流主要集中在子夜后到晨侧扇区, 亚暴电流楔驱动的西向电流主要出现在子夜扇区^[7,23], 它们对应不同的物理过程, 因而将同一世界时处于晨侧和子夜扇区的台站数据分开处理.

2 2000 年 4 月 6~7 日磁暴事件分析

图 1 给出了 2000 年 4 月 6~7 日磁暴事件太阳风参数、行星际磁场和地磁指数. 太阳风、行星际磁场参数来自 L1 处的 ACE 卫星, 地磁指数数据来自京都世界数据中心. 磁暴发生时, ACE 卫星位于太阳风上游(X, Y, Z)_{GSM} \approx (240, 30, 8) R_E 处. 取磁暴急始开始时间为太阳风动压脉冲到达向阳面磁层顶的时间, 可得到太阳风由 ACE 卫星到达地球的传播时间大致为 37 min. 在图 1 中 ACE 卫星数据已做了 37 min 时移. P_{sw} 在 4 月 6 日 1641 UT(图中 T_1 时刻)突然增强, 发生跃变, 引起磁暴急始, 同时 IMF B_z 急剧下降, 之后持续较长时间南向, 期间 $SYM-H$ 指数持续下降, 最低达 -320 nT, 表明环电流增强. 在整个磁暴主相期间, $ASY-D$ 和 $ASY-H$ 指数增强, 保持较高值, 甚至强于 $SYM-H$ 指数变化, 说明总场向电流和部分环电流都得到发展, 并且部分环电流的活动远强于环电流. AU 和 AL 指数的剧烈变化表明极区地磁活动强烈. AL 指数在 1641 UT, 2010 UT, 2120 UT, 0020 UT 数次突增, 很可能与磁尾爆发性活动有关. 4 月 7 日, 约 0100 UT(图中 T_2 时刻), IMF B_z 转北, 恢复相开始.

图 2(a)给出中纬地区地磁场东西向扰动量 ΔY 在 MLT-UT 坐标下的等值线图, 蓝色代表磁扰为负(西向磁扰), 对应流入电离层的场向电流; 红黄色代表磁扰为正(东向磁扰), 对应流出电离层的场向电流. IMF B_z 转南后, 磁暴主相开始. 随着主相发展, 北半球夜晚侧主要呈现东向磁扰, 扰动中心分布在子夜附近. 期间包含一些小尺度的西向磁扰. 当 IMF B_z 转北后, 东向磁扰特征开始减弱. 虽然在整个 IMF B_z 南向期间, 北半球夜侧东向磁扰一直存在, 但随着时

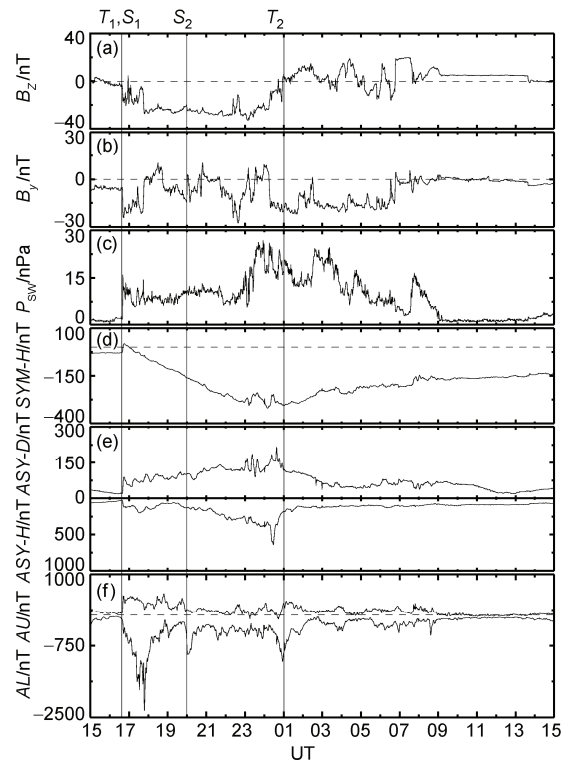


图 1 4 月 6 日 1500 UT~7 日 1500 UT 太阳风行星际磁场参数和地磁指数

(a)~(f)依次为行星际磁场 IMF B_z 、IMF B_y 、太阳风动压(P_{sw})、对称环电流指数 $SYM-H$ 、非对称环电流指数 $ASY-D$ 和 $ASY-H$ 以及 AU 和 AL 指数

间的发展, 其扰动最强处并不位于同一磁地方时. 对应于 AL 指数的数次增强(如图中所标 S_1, S_2 时刻), 子夜前/后中纬磁场也出现正/负向磁扰, 这很可能是受到亚暴产生的电流的影响.

为了考察亚暴电流的效应, 我们引入两个参数 Ψ 和 ζ , 分别描述与“直接驱动”过程场向电流相关的磁场扰动和亚暴电流引起的磁场变化^[24]. Ψ 定义为夜晚侧 2100–0300 MLT 区域平均 ΔY , ζ 定义为子夜前扇区 (2100–0000 MLT) 平均 ΔY 减去子夜后扇区 (0000–0300 MLT) 平均 ΔY . 根据亚暴电流楔模型, 电流楔由子夜后扇区流入电离层, 在中纬地区产生西向磁扰, 由子夜前扇区流出电离层, 在中纬地区产生东向磁扰. Ψ 在 2100–0300 MLT 区域平均的结果将亚暴电流楔产生的正负磁扰相互抵消, 可认为是消除了亚暴电流楔作用, 反应直接驱动过程的场向电流效应. ζ 的变化表现子夜前/后两个扇区 ΔY 的相对变化, ζ 增长意味着子夜前扇区 ΔY 增强, 也就是说子夜前扇区流出电离层的场向电流增强, 对应于亚暴电流楔的发

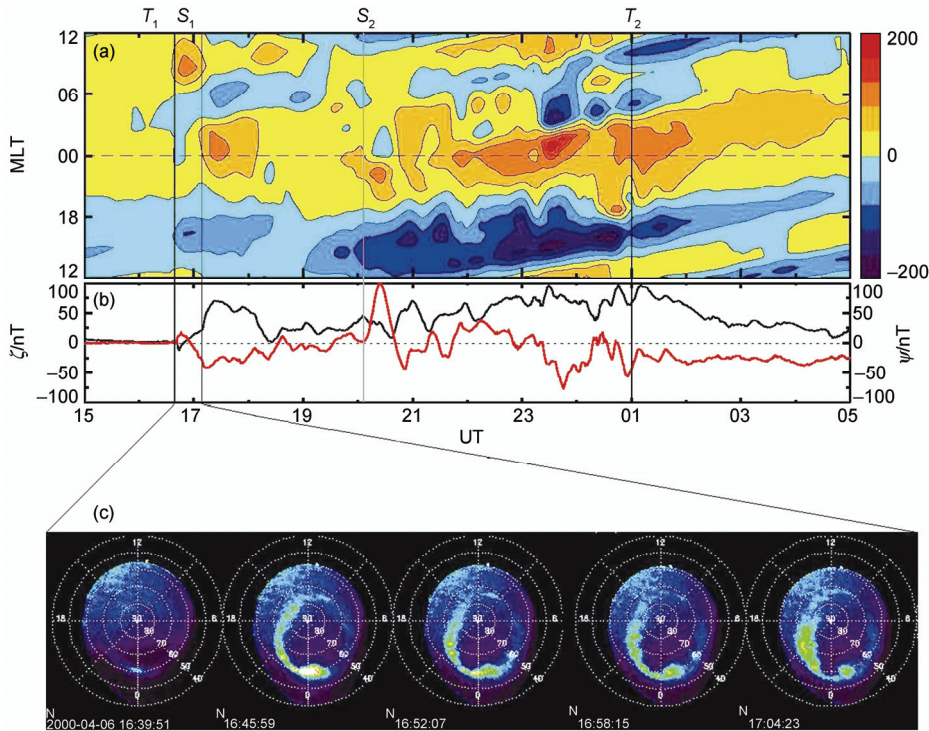


图2 4月6日1500 UT~7日0500 UT中纬地区磁场扰动和POLAR卫星UVI观测

(a) 中纬地区 ΔY 分量 MLT-UT 等值线图; (b) 黑色曲线为 2100-0300 MLT 区域平均 $\Delta Y(\Psi)$, 红色曲线为 2100-0000 MLT 区域平均 ΔY 减去 0000-0300 MLT 区域平均 $\Delta Y(\zeta)$; (c) POLAR 卫星 UVI 观测记录到 4 月 6 日 1640 UT 发生的一次亚暴事件

展. 需要指出, 因为亚暴电流楔的位置并不固定地出现在子夜前后, ζ 的变化并不完全由亚暴电流楔引起, 但它可以间接地近似反映亚暴电流楔对磁场 Y 分量扰动的影响.

从图 2(b)可以看出, Ψ 在 IMF B_2 持续南向期间为正, IMF B_2 转北后开始减弱. 这表明 IMF B_2 南向期间, 在北半球夜侧区域与直接驱动过程相伴随的场向电流主要为流出电离层的场向电流. 而在 Ψ 保持正值的区间, ζ 基本保持为负值, 这表明中纬子夜后扇区正向磁扰大于子夜前扇区, 即流出电离层的场向电流最强处分布在子夜后扇区. 磁暴期间 II 区场向电流在夜侧中纬地区引起的磁扰更为显著, 并且子夜后扇区流出电离层的场向电流主要为 II 区场向电流, 因此 Ψ 的增强对应了 II 区场向电流的发展. 4 月 6 日 1640 UT 之前, IMF B_2 短时间持续弱南向, 1640 UT P_{sw} 发生明显跃变, 南向 IMF B_2 增强, 同时 AL 指数大幅下降, 接近 -2500 nT, 此时 POLAR 卫星 UVI 观测(图 2(c))显示出极光点亮与极向膨胀的过程, 说明太阳风动压变化触发了极光亚暴^[25]. 对应亚暴的发生, 中纬地区东西向磁扰(图 2(a))表现出子夜前为东

向, 子夜后为西向的磁扰特征, 也就是说子夜附近产生一对场向电流, 由子夜后流入电离层, 子夜前流出电离层, 具有亚暴电流楔的特征. 对比图 2(b) ζ 的变化可以看出, ζ 很好地体现了亚暴电流楔演变过程中产生的地磁效应, ζ 增强对应着亚暴电流楔的发展, ζ 减弱对应着亚暴电流楔的减弱. 在此期间 AL 指数的剧烈扰动包含了太阳风动压造成磁层位形改变而增强的西向电集流, 很难辨别亚暴电流的贡献. 2010 UT ζ 有一处明显增强, 这段时间 IMF B_2 持续南向, P_{sw} 无明显变化, 对应 AL 指数下降超过 -800 nT, 这次亚暴事件很可能由磁层内部扰动触发, 中纬地区子夜附近东西向磁扰表现出更为清晰的亚暴电流楔特征. 从图 2(b)还可以看出, 对应 ζ 的每次增强, Ψ 有一个减弱过程, 当 ζ 开始衰减时, Ψ 也开始增强, 即亚暴电流楔的发展对北半球夜侧流出电离层的场向电流有先减弱后增强的效应.

进一步分析极区磁场变化, 考虑到西向电集流两种成分分布在不同磁地方时扇区, 对高纬台站进行如下分类: 对应每一 UT 时刻, 分别选出磁地方时处于子夜后-晨侧扇区(0100-0600 MLT)和子夜扇区

(2200~0100 MLT)的台站,组成两组数据,取每组数据中扰动极大值,作为这一 UT 时刻两个扇区西向电集流的表征,最后得到描绘子夜后-晨侧扇区对流驱动的西向电集流和子夜扇区亚暴电流楔驱动的西向电集流的两条随 UT 时变化的曲线.图 3 中灰色曲线给出了子夜后-晨侧扇区的变化曲线,表示这一扇区西向电集流的特征.黑色曲线给出了子夜扇区的变化曲线,表现与亚暴电流楔闭合的西向电集流.图中曲线的不连续是由台站经向分布不连续造成的.

对比图 2(b)和图 3, Ψ 的增强对应着子夜后-晨侧扇区扰动磁场 X 分量的降低(1640 UT, 1730 UT, 2320 UT, 0030 UT),也就是说与“直接驱动”过程相关,且流出电离层的场向电流与子夜后扇区西向电集流之间有显著联系.而 ζ 的增强与子夜扇区 X 分量的降低(2010 UT, 2100 UT, 2120 UT, 2140 UT, 2200 UT, 0040 UT)近乎一一对应,进一步说明 ζ 的发展体现了楔状电流的发展.

3 讨论

从本文的结果中可以得出,磁暴主相期间整个北半球夜侧中纬地区呈现东向磁扰为主的特征,并且子夜后扇区东向磁扰强于子夜前扇区.随着 IMF B_z 转北,北半球夜侧中纬地区东向磁扰开始减弱.东向磁扰源于由高纬电离层流出的场向电流,也就是说磁暴主相期间夜侧以流出电离层的场向电流为主,其强度中心位于子夜后扇区,靠近子夜.考虑到强磁扰时,II 区场向电流强度与 I 区场向电流相当,而且 II 区场向电流更靠近地球,是强磁暴期间引起中纬夜侧磁场扰动的主要电流系,且子夜后扇区流出电离层的场向电流主要为 II 区场向电流^[26],得出磁暴主相期间北半球夜侧 II 区场向电流以流出电离层为主.磁暴发生时,大量磁尾粒子向内磁层注入,其中低能离子受 $E \times B$ 漂移主导,而高能粒子受梯度/曲率漂移主导,造成高能粒子在昏侧的堆积,产生了一个

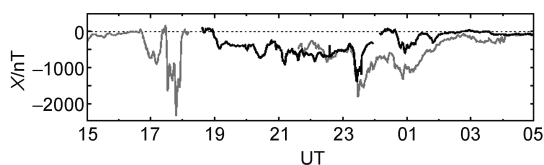


图 3 4月6日 1500 UT~7日 0500 UT 高纬磁场扰动
灰色曲线为 0100~0600 MLT 之间的台站的数据,黑色曲线是
2200~0100 MLT 之间的台站的数据

西向热压梯度.内磁层偶极场起主导作用,磁场梯度指向地球,西向的热压梯度与地向磁场梯度在北半球夜侧产生流出电离层的场向电流^[27,28],环电流的离子在西向漂移过程中,受晨昏电场的加速,进一步提升了昏侧的热压.一些观测结果证实了西向热压梯度的存在^[29].在上述作用下北半球整个夜侧出现流出电离层的场向电流为主的特征,其中心在子夜后扇区,靠近子夜,即磁暴期间部分环电流和 II 区场向电流系统整体向昏侧偏转.这个结果与吴迎燕等人^[14]暴时环电流最强分布在昏侧的结论一致.Le 等人^[30]对卫星观测的统计研究表明,随着 Dst 指数的增强,部分环电流密度中心扭转到黄昏-子夜前扇区,但流入/流出电离层的 II 区场向电流仍分布在昏/晨侧.Le 等人^[30]的工作只涉及中等强度磁暴($Dst > -100$ nT),我们认为部分环电流和 II 区场向电流体系的昏侧偏转与磁暴强度密切相关,强度越大偏转越大.

从本文结果还可以看出,磁暴主相期间发生的亚暴对场向电流和环电流系统的效应十分明显.亚暴膨胀相发生时,II 区场向电流减弱,膨胀相之后,II 区场向电流明显增强.可能的解释是亚暴膨胀相时,磁尾越尾电流中断,磁场偶极化,亚暴电流楔发展(对应 ζ 增加)起来,而亚暴增长相期间建立的压强梯度突然减小,导致 II 区场向电流减小(对应 Ψ 减小).另一方面,随着亚暴膨胀相的发展,等离子体片中的大量热粒子注入到内磁层,受磁场梯度漂移的作用集中在昏侧-子夜扇区,加大了内磁层西向热压梯度.膨胀相结束后,在晨昏电场的作用下,偶极化的磁场逐渐恢复到拉伸的磁尾磁场位形,磁场梯度增强.这一过程引起 II 区场向电流在亚暴膨胀相之后明显增长.

北半球夜侧与“直接驱动”过程相关的场向电流和子夜后扇区西向电集流之间有显著联系,早期 Iijima 和 Potemra 的研究结果也表明 II 区场向电流和极光集流有密切关系^[31],这说明 II 区场向电流和对流电集流均受对流电场控制.事实上,II 区场向电流可通过两种方式影响极光集流,一是流出电离层的 II 区场向电流在其极侧产生南向电场,驱动西向电集流;二是 II 区场向电流自子夜后扇区极光卵低纬边界流出,沿场向电流沉降电子使这一区域电导率增强,从而加强西向电集流.最近的一些观测也表明,随着磁暴主相期间部分环电流和 II 区场向电流的发展,极区昏侧对流涡向晨侧延伸,扩展到晨

侧对流涡的低纬一侧^[32], 这一效应使得原来的东向对流增强, 也就是增强了西向电集流。

我们假设春秋分时磁层电流南北对称, 故而利用了南半球台站数据。应当指出, 即使在春秋分时南北半球电流分布也不是完全对称的, 尤其是电离层电流。但磁层电流的南北偏差较小, 在定性研究中通常假设春秋分南北半球对称, 简化问题, 且弥补观测点的不足。本文讨论夜侧磁层电流的地磁效应, 略微南北不对称性不会影响到本文的基本结论。

4 结论

本文利用全球分布的地磁台站数据, 研究了2000年4月6日超级磁暴事件夜侧场向电流的变化特

征。研究结果如下:

(i) 磁暴主相期间北半球中纬地区整个夜侧呈现东向磁扰效应, 磁扰强度中心随时间变化, 子夜后扇区东向磁扰强于子夜前扇区。表明北半球夜侧 II 区场向电流以流出电离层为主, 强度中心在子夜后扇区, 靠近子夜。由此推断, 磁暴主相期间 II 区场向电流和部分环电流体系向昏侧偏转。

(ii) 亚暴膨胀相发生时, 磁层亚暴对夜侧流出电离层的场向电流有一个先减弱后增强的效应。

(iii) 磁暴主相期间北半球夜侧流出电离层的场向电流发展与子夜后-晨侧扇区西向电集流增强相对应。中纬子夜扇区磁扰对应高纬子夜扇区西向电集流, 呈现亚暴电流特征。

参考文献

- 1 Sibeck D G. A model for the transient magnetospheric response to sudden solar wind dynamic pressure variations. *J Geophys Res*, 1990, 95: 3755—3771
- 2 Chen G X, Lin Y, Cable S. Generation of traveling convection vortices and field-aligned currents in the magnetosphere by response to an interplanetary tangential discontinuity. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 3583—3586
- 3 Lanzerotti L J, Wolfe A, MacLennan C, et al. Ionosphere and ground-base response to field-aligned currents near the magnetospheric cusp region. *J Geophys Res*, 1987, 92: 7739—7743
- 4 Xu W Y, Kamide Y. Decomposition of daily geomagnetic variations by using method of natural orthogonal component. *J Geophys Res*, 2004, 109: A05218
- 5 Feldstein Y I, Popov V A, Cumnock J A, et al. Auroral electrojets and boundaries of plasma domains in the magnetosphere during magnetically disturbed intervals. *Ann Geophys*, 2006, 24: 2243—2276
- 6 Xie L, Pu Z Y, Fu S Y. Energization and injection of intense storm ring current ions. In: Wang H N, Xu R L, eds. *Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment*. COSPAR Colloquium, Ser 14. Oxfordshire: Pergamon Press, 2002. 271—274
- 7 Kamide Y, Kokubun S. Two-component auroral electrojet: Importance for substorm studies. *J Geophys Res*, 1996, 101: 13027—13046
- 8 Sun W, Ahn B H, Akasofu S I, et al. A comparison of the observed mid-latitude magnetic disturbance fields with those reproduced from the high-latitude modeling current system. *J Geophys Res*, 1984, 89: 10881—10889
- 9 Clauer C R, McPherron R L. Mapping the local time-universal time development of magnetospheric substorms using mid-latitude magnetic observations. *J Geophys Res*, 1974, 79: 2811—2820
- 10 徐文耀. 地球电磁现象物理学. 合肥: 中国科技大学出版社, 2009. 401
- 11 Hairston M R, Drake K A, Skoug R. Saturation of the ionospheric polar cap potential during the October–November 2003 superstorms. *J Geophys Res*, 2005, 110: A09S26
- 12 Ebihara Y, Fok M C, Sazykin S, et al. Ring current and the magnetosphere-ionosphere coupling during the superstorm of 20 November 2003. *J Geophys Res*, 2005, 110: A09S22
- 13 Gopalswamy N, Barbieri L, Cliver E W, et al. Introduction to violent Sun–Earth connection events of October–November 2003. *J Geophys Res*, 2005, 110: A09S00
- 14 吴迎燕, 徐文耀, 陈耿雄, 等. 暴时环电流不对称性的地面磁场特征研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 424—431
- 15 王馨悦, 刘振兴, 沈超. 磁暴主相期间环电流分布特征模拟研究. *物理学报*, 2007, 56: 7346—7354
- 16 Brandt P C son, Ohtani S, Mitchell D G, et al. Global ENA observations of the storm mainphase ring current: Implications for skewed electric fields in the inner magnetosphere. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1954—1956
- 17 Akasofu S I. *Polar and Magnetospheric Substorms*. Norwood: D Reidel Publishing Company, 1968. 44
- 18 Iyemori T, Rao D R K. Decay of the Dst field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implication to storm-substorm relation. *Ann Geophys*, 1996, 14: 608—618
- 19 Ahn B H, Kroehl H W, Kamide Y, et al. Universal time variations of the auroral electrojet indices. *J Geophys Res*, 2000, 105: 267—275

- 20 Xu W Y, Chen G X, Du A M, et al. Key points model for polar region currents. *J Geophys Res*, 2008, 113: A03S11
- 21 徐文耀. 内磁层电流体系的地磁效应. *地球物理学报*, 1992, 35: 3—10
- 22 杨少峰, 杜爱民, 高玉芬, 等. 2000年4月6日磁暴期间磁扰变化在低纬子午链的纬度效应. *地球物理学报*, 2002, 45: 461—469
- 23 徐文耀. 亚暴期间极光电流带的变化. *地球物理学报*, 2009, 52: 607—615
- 24 Nakano S, Iyemori T. Storm-time field-aligned currents on the nightside inferred from ground-based magnetic data at midlatitudes: Relationships with the interplanetary magnetic field and substorms. *J Geophys Res*, 2005, 110: A07216
- 25 洪明华, 王宪民, Chua D, 等. 极光亚暴对太阳风压强激波的响应. *科学通报*, 2001, 46: 1113—1118
- 26 Hoffman R A, Fujii R, Sugiura M. Characteristics of the field-aligned current system in the nighttime sector during auroral substorms. *J Geophys Res*, 1994, 99: 21303—21325
- 27 Iijima T. Field-aligned current in geospace: Substance and significance. In: Ohtani S I, Fujii R, Hesse M, et al, eds. *Magnetospheric Current Systems*, Geophys Monogr Ser. Washington DC: American Geophysical Union, 2000, 118: 107—129
- 28 Liemohn M W, Kozyra J U, Thomsen M F, et al. Dominant role of the asymmetric ring current in producing the stormtime Dst*. *J Geophys Res*, 2001, 106: 10883—10904
- 29 Ebihara Y, Ejiri M, Nilsson H, et al. Statistical distribution of the storm-time proton ring current: POLAR measurements, 2002. *Geophys Res Lett*, 1969, 29: 1969—1972
- 30 Le G, Russell C T, Takahashi K. Morphology of the ring current derived from magnetic field observations. *Ann Geophys*, 2004, 22: 1267—1295
- 31 Iijima T, Potemra T A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad. *J Geophys Res*, 1976, 81: 2165—2174
- 32 Kataoka R, Nishitani N, Ebihara Y, et al. Dynamic variations of a convection flow reversal in the subauroral postmidnight sector as seen by the SuperDARN Hokkaido HF radar. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L21105.1—L21105.5