第7卷 第2期 空间科学学报 Vol. 7, No. 2
1987 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 1987

# 用中低纬度地磁资料确定 $S_q^e$ 电流体系的焦点

徐文耀
（中国科学院地球物理研究所）

**摘 要**

本文分析了 $S_q^e$ 电流体系与地面磁场的关系，指出用地面磁场的太阳日变化所确定的 $S_q^e$ 电流体系视焦点与该电流体系真焦点的差异，讨论了用中低纬度地磁资料确定 $S_q^e$ 电流体系焦点的几种近似方法，并用 IGY/C 期间全球地磁资料检验了这些方法的有效性和可能误差.

## 一、引 言

地磁场静日变化 $S_q$ 的等效电离层电流体系 $S_q^e$ 有两个重要的参数：总电流强度和电流涡焦点位置. 这两个参数决定于电离层发电机过程和场向电流分布，因而包含着电离层电导率和太阳潮汐风场的重要信息. 焦点位置的移动与太阳活动、太阳风参数以及行星际磁场结构有密切关系，因此 $S_q^e$ 焦点位置又是研究和监视太阳活动和行星际空间状态的有用参数[1-3]. Matsushita 用不同经度范围内的地磁资料得到的 $S_q^e$ 电流体系有一定差异，暗示了全球潮汐风场随经度的变化[4]. 此外，非对称发电机过程所伴随的中低纬度场向电流也与 $S_q^e$ 焦点位置有密切的关系[5,6].

确定 $S_q^e$ 电流体系焦点的常用方法是全球地磁资料的球谐分析[7]，但是这种方法目前还无法用于实时监视预报，对于只有局部地区资料的情况也难适用. 由于我国地处中低纬度区，正是 $S_q^e$ 电流体系焦点通过的地带，所以讨论用中低纬度地区局部地磁资料确定 $S_q^e$ 电流焦点的问题对我们有直接的实用意义.

国内外学者提出了许多确定 $S_q^e$ 电流焦点的简便而实用的方法. 早在 1940 年，Chapman 等人用地面磁场 $S_q$ 变化的形态特征估计电流焦点的近似位置，指出地磁水平分量 $X$ 和 $Y$ 的 $S_q$ 变化在焦点处变号，而垂直分量 $Z$ 的 $S_q$ 变化在焦点处出现极值[8]. 我国地磁工作者对“日变换向带”的兴趣也集中在 $S_q^e$ 电流焦点附近磁场的特征上[9]. 为了从地磁干扰中分离出 $S_q$，1981 年 Hibberd 用同一经线上焦点南北两侧的一对台站的 $H$ 分量之差来消除远磁层电流的影响，研究 $S_q^e$ 电流的结构和强度[10]. 1983 年 Rajaram 用多元分析方法消除磁扰的影响，确定 $S_q^e$ 焦点[11]. 应该指出的是，以上作者多是用少量地面台站

本文于 1986 年 9 月 13 日收到.

地磁场日变化的特征来估计 $S_q^e$ 焦点位置，这样得到的焦点与全球资料球谐分析得到的焦点一般来说是不同的．为了区别起见，我们分别称之为“视焦点”和“真焦点”．

本文从地磁场位理论出发，分析视焦点和真焦点的差异，用 IGY/C 期间全球地磁台网的资料讨论用地面磁场估计 $S_q^e$ 焦点的可能途径并检验其有效性和误差范围．

## 二、$S_q^e$ 电流体系的真焦点和视焦点

用全球地磁资料可以求出 $S_q$ 的等效电离层电流体系 $S_q^e$ 及其在地球内的感应电流体系 $S_q^i$，它们分别用电流函数 $J^e$ 和 $J^i$ 表示如下：

$$J^e=\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}J_n^{me}=-\frac{10}{4\pi}\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\frac{2n+1}{n+1}\left(\frac{r}{R}\right)^n\Omega_n^{me},\tag{1}$$

$$J^i=\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}J_n^{mi}=\frac{10}{4\pi}\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\frac{2n+1}{n}\left(\frac{R}{r}\right)^n\Omega_n^{mi}.\tag{2}$$

式中 $R$ 是地球半径，$r$ 是地心距，$N$ 是级数截断水平，上标 $e$ 和 $i$ 分别表示外源和内源部分．$\Omega_n^{me}$ 和 $\Omega_n^{mi}$ 分别表示地磁场标量位中的外源和内源部分：

$$\Omega_n^{me}=R\left(\frac{r}{R}\right)^n E_n^m\cos(m\varphi+\varepsilon_n^m)P_n^m(\theta),\tag{3}$$

$$\Omega_n^{mi}=R\left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} I_n^m\cos(m\varphi+i_n^m)P_n^m(\theta).\tag{4}$$

式中 $E_n^m$、$I_n^m$、$\varepsilon_n^m$ 和 $i_n^m$ 是外源场和内源场的振幅和相位，可由地面磁场资料确定．

$S_q^e$ 电流体系真焦点必须满足下面的条件

$$\frac{\partial J^e}{\partial\theta}=\frac{\partial J^e}{\partial\varphi}=0,\tag{5}$$

即

$$\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\frac{2n+1}{n+1}\frac{\partial\Omega_n^{me}}{\partial\theta}=0,\tag{6}$$

$$\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\frac{2n+1}{n+1}\frac{\partial\Omega_n^{me}}{\partial\varphi}=0.\tag{7}$$

但是，$S_q^e$ 视焦点是由以下条件确定的：

$$X=Y=0,\tag{8}$$

或者

$$\frac{\partial Z}{\partial\theta}=\frac{\partial Z}{\partial\varphi}=0.\tag{9}$$

地磁场分量 $X$、$Y$、$Z$ 可由磁位求得

$$X=X^e+X^i=\frac{1}{R}\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{\partial\Omega_n^{me}}{\partial\theta}+\frac{\partial\Omega_n^{mi}}{\partial\theta}\right),\tag{10}$$

$$Y=Y^e+Y^i=-\frac{1}{R\sin\theta}\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{\partial\Omega_n^{me}}{\partial\varphi}+\frac{\partial\Omega_n^{mi}}{\partial\varphi}\right),\tag{11}$$

$$Z = Z^e + Z^i = \frac{1}{R}\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}[n\Omega_n^{me} - (n+1)\Omega_n^{mi}]. \tag{12}$$

因此视焦点的条件(8)可以写成

$$\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{\partial\Omega_n^{me}}{\partial\theta} + \frac{\partial\Omega_n^{mi}}{\partial\theta}\right) = 0, \tag{13}$$

$$\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{\partial\Omega_n^{me}}{\partial\varphi} + \frac{\partial\Omega_n^{mi}}{\partial\varphi}\right) = 0. \tag{14}$$

条件 (9) 可以写成

$$\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left[n\frac{\partial\Omega_n^{me}}{\partial\theta} - (n+1)\frac{\partial\Omega_n^{mi}}{\partial\theta}\right] = 0, \tag{15}$$

$$\sum_{n=0}^{N}\sum_{m=0}^{n}\left[n\frac{\partial\Omega_n^{me}}{\partial\varphi} - (n+1)\frac{\partial\Omega_n^{mi}}{\partial\varphi}\right] = 0. \tag{16}$$

将真焦点条件(6)、(7)与视焦点条件(13)、(14)或者(15)、(16)作对比，可以看到，即使完全不考虑内源场的影响，它们也是不同的．不仅如此，用 $X$、$Y$ 分量得到的视焦点与用 $Z$ 分量得到的视焦点也有差异．

## 三、$S_q^e$电流体系在地表产生的磁场

为了说明 $S_q^e$ 电流体系真焦点和视焦点之间的关系，表 1 列出了 IGY/C 期间 $S_q^e$ 的基本参数[12,13]．用毕奥-沙伐定律可以求出该电流系在地表的磁场．图 1 画出北半球年平均地面磁场分布．

**表 1　IGY/C 期间 $S_q^e$ 电流体系的基本特征**

| | | 焦　点　位　置 | | 总电流强度 (kA) |
|---|---|---|---|---|
| 北半球 | D 月 | 30°N | 12.1h | 138 |
| | E 月 | 32°N | 11.0h | 211 |
| | J 月 | 30°N | 10.2h | 229 |
| | 年平均 | 30°N | 11.0h | 182 |
| 南半球 | D 月 | 32°S | 11.0h | 254 |
| | E 月 | 32°S | 12.0h | 270 |
| | J 月 | 33°S | 12.8h | 205 |
| | 年平均 | 32°S | 12.0h | 210 |

图中黑圆点表示 $S_q^e$ 电流体系真焦点．可以看出：(1)北向分量 $X^e$ 在焦点以北为负，以南为正，零等值线通过焦点附近；(2)东向分量 $Y^e$ 上午为正，下午为负，零等值线近似与焦点经线重合；(3)垂直分量 $Z^e$ 的主极小值远离焦点，靠近赤道，而次极小值位于焦点附近．这就是说用(8)式定出的视焦点位置接近真焦点．至于 $Z^e$ 主极值靠近赤道的原因是因为在本电流系中包含了很强的赤道电射流的缘故，如果考虑 $Z^e$ 的次极值，则(9)式定出的视焦点也接近真焦点．由上所述可知，用地面 $S_q$ 变化的特征可以近似估计 $S_q^e$ 电流

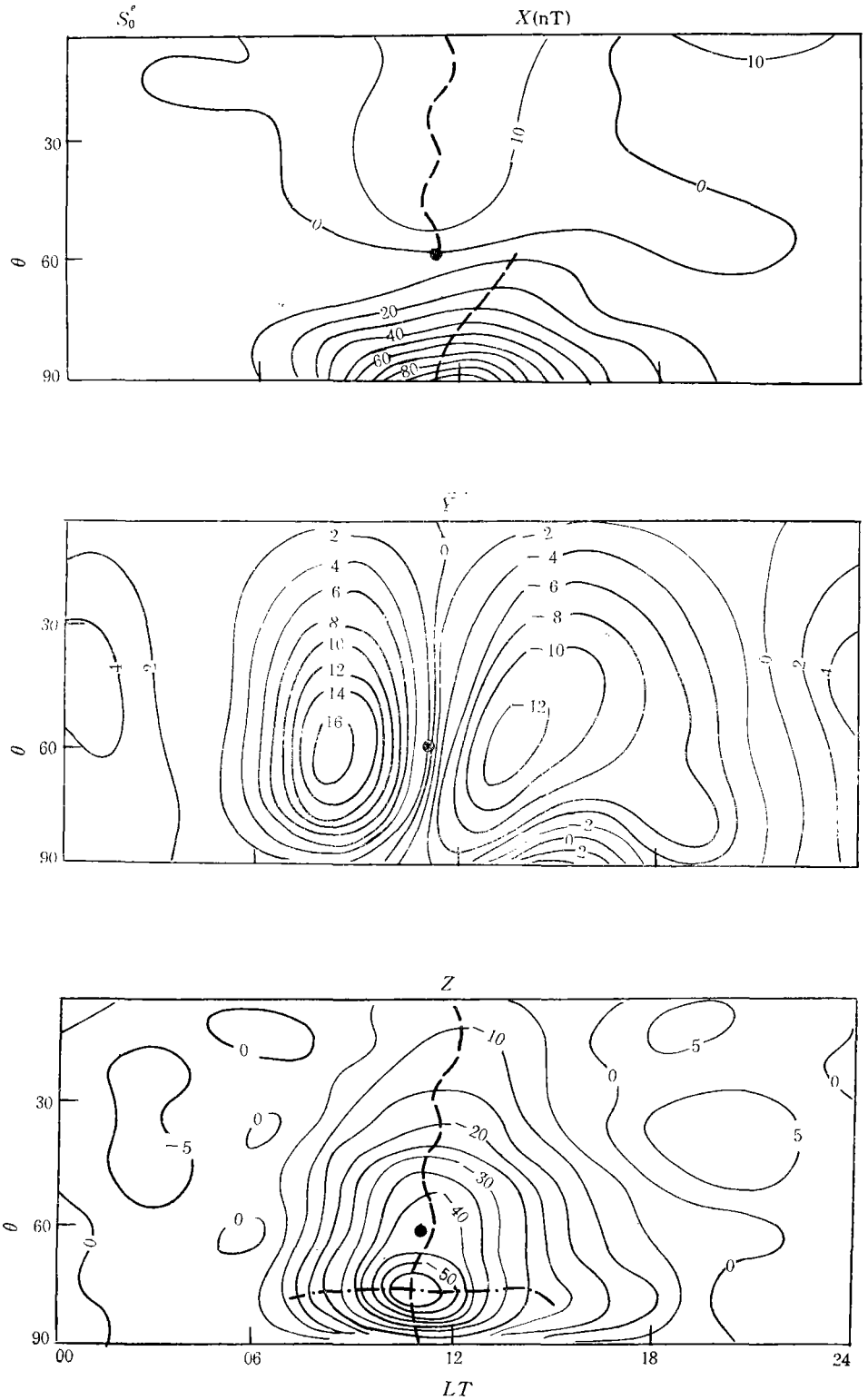



图 1　$S_q^e$ 电流体系在地面产生的磁场(单位 nT)

Fig. 1　Magnetic field at the earth's surface by $S_q^e$ current system (unit nT)

体系的焦点．关于真焦点和视焦点的差异我们将在下节讨论．

## 四、用地面磁场资料估计 $S_q^e$ 电流焦点时遇到的几个问题

1. 基线问题：在分析变化磁场和计算电流、电场的时候，基线的选择是一个重要的问题．Chapman 用日均值作基线得到的 $S_q^e$ 电流体系包含着强度很大的夜间电流涡(约为白天的一半)[8]．Matsushita 认为，夜间电离层电导率比白天小一个数量级或更多，因而夜间 $S_q^e$ 电流应该很弱，他认为取夜间磁场值为基线更合理一些[4]．

在用地磁日变化估计 $S_q$ 焦点位置时，基线值的选择虽不影响日变形态，但对各地磁分量的过零时刻和极值大小有很大影响，这在下面的讨论中可以看到．

2. 用单台、子午台链和台阵确定 $S_q^e$ 焦点：利用单台 $S_q$ 变化特征可以近似估计 $S_q^e$ 焦点地方时．图 1 $Y^e$、$Z^e$ 分量图中南北向的虚线表示不同纬度台站上 $Y^e = 0$ 和 $Z^e = Z^e_{\min}$ 的地方时，在余纬 $\theta = 50°$—$70°$ 范围内，这样确定的地方时与 $S_q^e$ 真焦点地方时相差小于 15 分钟 ($Y^e$ 分量)或小于 30 分钟 ($Z^e$ 分量)．但是单台日变无法估计焦点纬度，由单台的 $X^e$ 分量只能判断 $S_q^e$ 焦点是在台站以北还是以南．

用一条南北向的子午台链，既可估计焦点地方时(方法同上)，又可估计焦点纬度．图 2 是 $X^e$、$Z^e$ 分量中午极值以及 $Y^e$ 分量中午零值出现的地方时随纬度的变化．在 $\theta = 50°$—$70°$ 范围内，$Y^e$ 和 $Z^e$ 给出焦点地方时很好的近似估计．图 3 画出 $X^e$、$Z^e$ 分量日变幅随纬度的变化，$X^e$ 日变幅为零以及 $Z^e$ 日变幅取次极值的纬度近似给出 $S_q^e$ 焦点的纬度．图 2 和图 3 中的其他曲线将在下面讨论．

如果有一组中低纬度地磁台站，则可以构制每一时刻地磁场分量等值线图(类似于图 1)，从而估计焦点位置及其随时间变化的情况，这特别适用于我国的情况．

3. 磁扰对 $S_q^e$ 焦点位置的影响：在磁场平静的条件下，$S_q$ 是地磁日变化的主要成分，前面讨论的估计 $S_q^e$ 焦点位置的方法是适用的．但是在磁扰日，扰动变化使日变发生一定的畸变，影响了上述方法的精度．扰动变化的主要原因是高纬电流体系 $S^{pe}$．图 4 是 $S^{pe}$ 电流体系在不同纬度上产生的磁场平均值和极值(不计正负号)．可以看到，它在中低纬度区产生的磁场平均约为 5 nT，最大值可达 15 nT．图 5 是 $S_q^e + S^{pe}$ 合成电流体系 $S^e$ 产生的地面磁场．$X^e = 0$ 的等值线虽然仍通过焦点附近，但磁场分布有较大畸变．特别是在夜间，$S^{pe}$ 的贡献超过了 $S_q^e$，这会影响基线值的选择，这种影响的严重性在图 3 的 $X^e$ 分量上可以看得十分清楚：在焦点以南 $\theta = 60$—$70°$ 范围内 $S^e$ 电流产生的 $X^e$ (虚线)有较大的负值变幅，这是 $S^{pe}$ 夜间磁场抬高了 $X^e$ 分量基线的结果．此外，$Y^e = 0$ 的等值线在中低纬地区东移了 0.5—1 小时，$Z^e$ 分量的次极值点东移了约 40 分钟．因此，极区电流体系的影响是 $S_q^e$ 焦点估计中一个不可忽略的因素．电离层其他电流的影响有时也是相当显著的，所以磁扰日的 $S_q^e$ 焦点的估计精度一般是较低的．

4. 内源场的影响：当用地磁台站的磁场日变化形态估计 $S_q^e$ 焦点时，必须注意到其中包含着内源场的贡献(参看(13—16)式)．由于局部磁场的内外源部分分离很困难，所以有必要研究内源场对焦点估计带来的影响．图 6 是电离层电流 $S^e$ 和地下感应电流 $S^i$ 共同产生的地面磁场．与图 5 中 $S^e$ 产生的磁场相比，$X$ 和 $Y$ 分量增加约 0.5 倍，$Z$ 分量约减

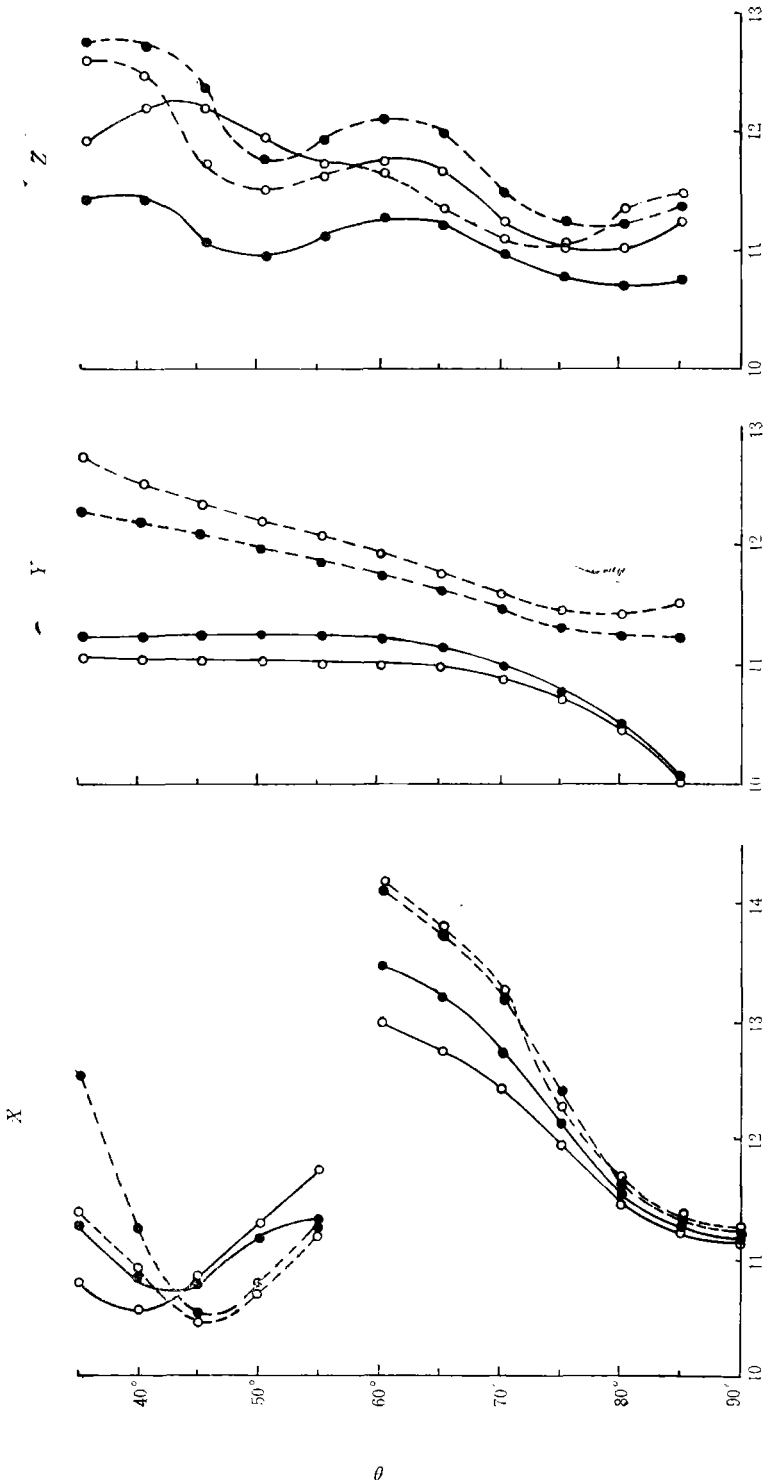



图 2 地面磁场 $X$、$Z$ 分量中午极值及 $Y$ 分量中午零值出现的地方时随纬度的变化

Fig. 2 Latitudinal variations in the local times of the noon extrema of $X$, $Z$ and zero values of $Y$

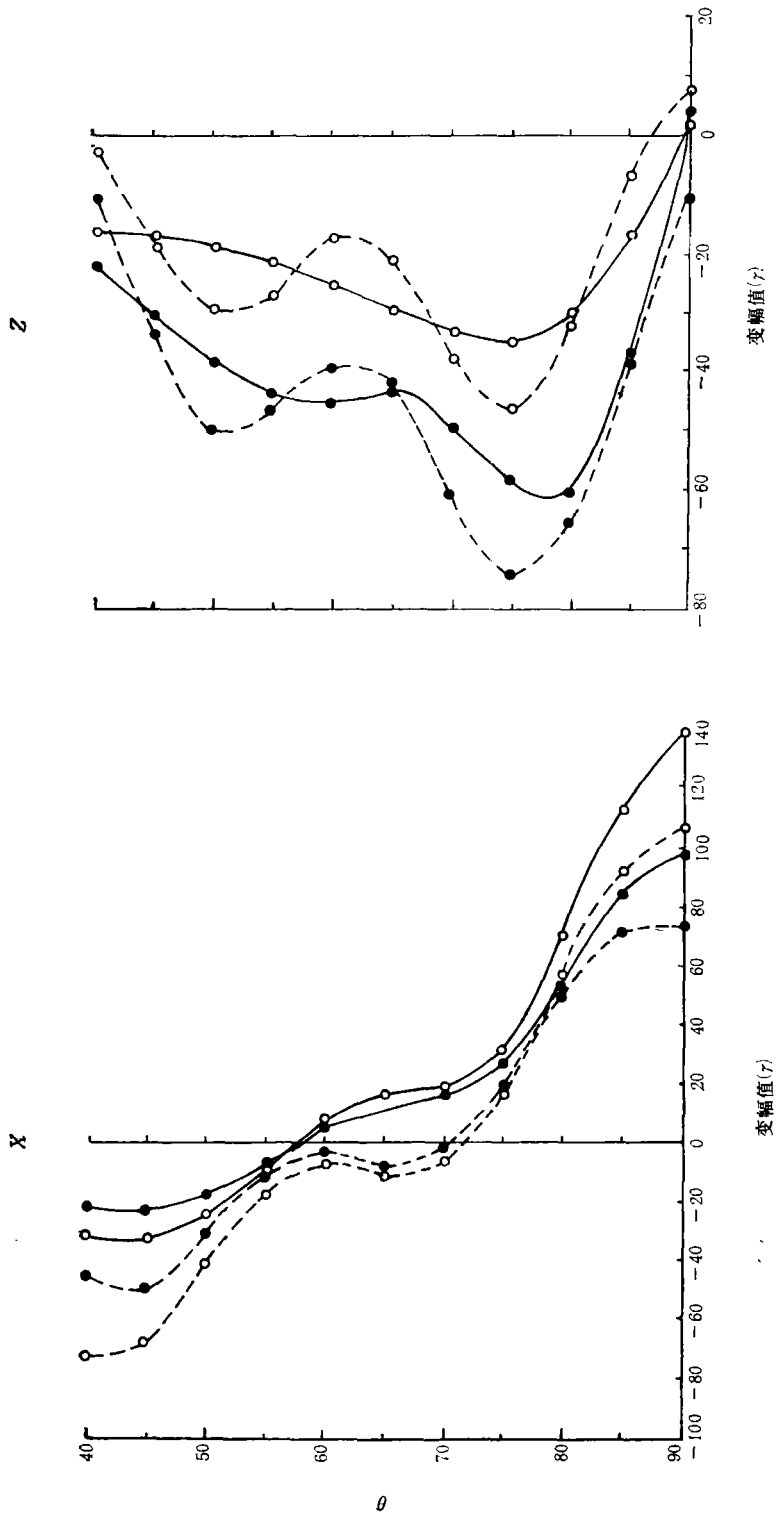
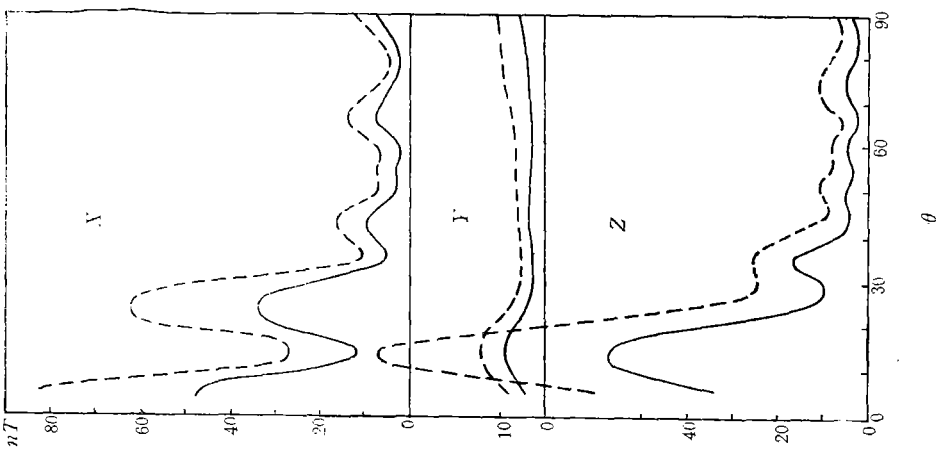



图 3　地面磁场日变幅随纬度的变化

Fig. 3　Latitudinal variations of the daily range of $S_q$ at the earth's surface




——沿纬圈的均值 (mean value)， ----最大值 (maximum)

图 4 $S^{pe}$ 电流产生的地面磁场值随纬度的变化

Fig. 4 Latitudinal variations of the magnetic field caused by $S^{pe}$ currents

**表 2 几种 $S_q^e$ 焦点估计值的比较**

| 焦点参数 | 估计焦点时所用的地磁分量 | $S_q^e$ | $S_q^{e+i}$ | $S^e$ | $S^{e+i}$ | 真焦点 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 余纬 $\theta$ | $X$ 变幅 | 58° | 58° | 71°(60°) | 72°(60°) | 60° |
| | $Z$ 变幅 | 60° | / | 51° | 52° | |
| 地方时 $t$ | $X$ 极值 | 11:00 | 11:00 | 11:00 | 10:45 | 11:00 |
| | $Y$ 零值 | 11:10 | 11:00 | 11:50 | 11:50 | |
| | $Z$ 极值 | 11:10 | 11:40 | 11:50 | 11:30 | |

注：(1) 括号中的数字是用 $X$ 分量在 $\theta = 60°$ 附近的极小值估计的数字(图 3).

(2) 地方时是 $\theta = 50°$—$70°$ 范围内的平均估计值 (对于 Y、Z 分量)或 $\theta = 40°$—$55°$ 范围内的平均估计值.

小一半，磁场分布图案并无明显改变. 图 2、3 中带圆圈的虚线给出了 $S^e + S^i$ 的结果，它与 $S^e$ 的结果很接近，因此，在用地面磁场估计 $S_q^e$ 焦点时，内源场的影响可以不考虑.

表 2 列出上述几种方法的对比，由表可以看出各种因素对焦点估计的影响.

## 五、结 论

1. 用地面磁场的日变化可以近似估计 $S_q^e$ 电流焦点. 在静日情况下，纬度的估计误差小于 2°，地方时误差小于 40 分钟.

2. 在扰日情况下，估计误差显著增加，纬度误差可达 10° 以上，地方时误差接近 1 小时.

3. 影响 $S_q^e$ 焦点估计的主要因素是磁扰，内源场的影响在实际工作中可以不考虑.

应该指出，本文用 IGY/C 期间平均电流体系对 $S_q^e$ 焦点位置进行了讨论，只是给出了视焦点和真焦点的一般关系和差异. 事实上，由于地磁场日变化与太阳活动、季节等有

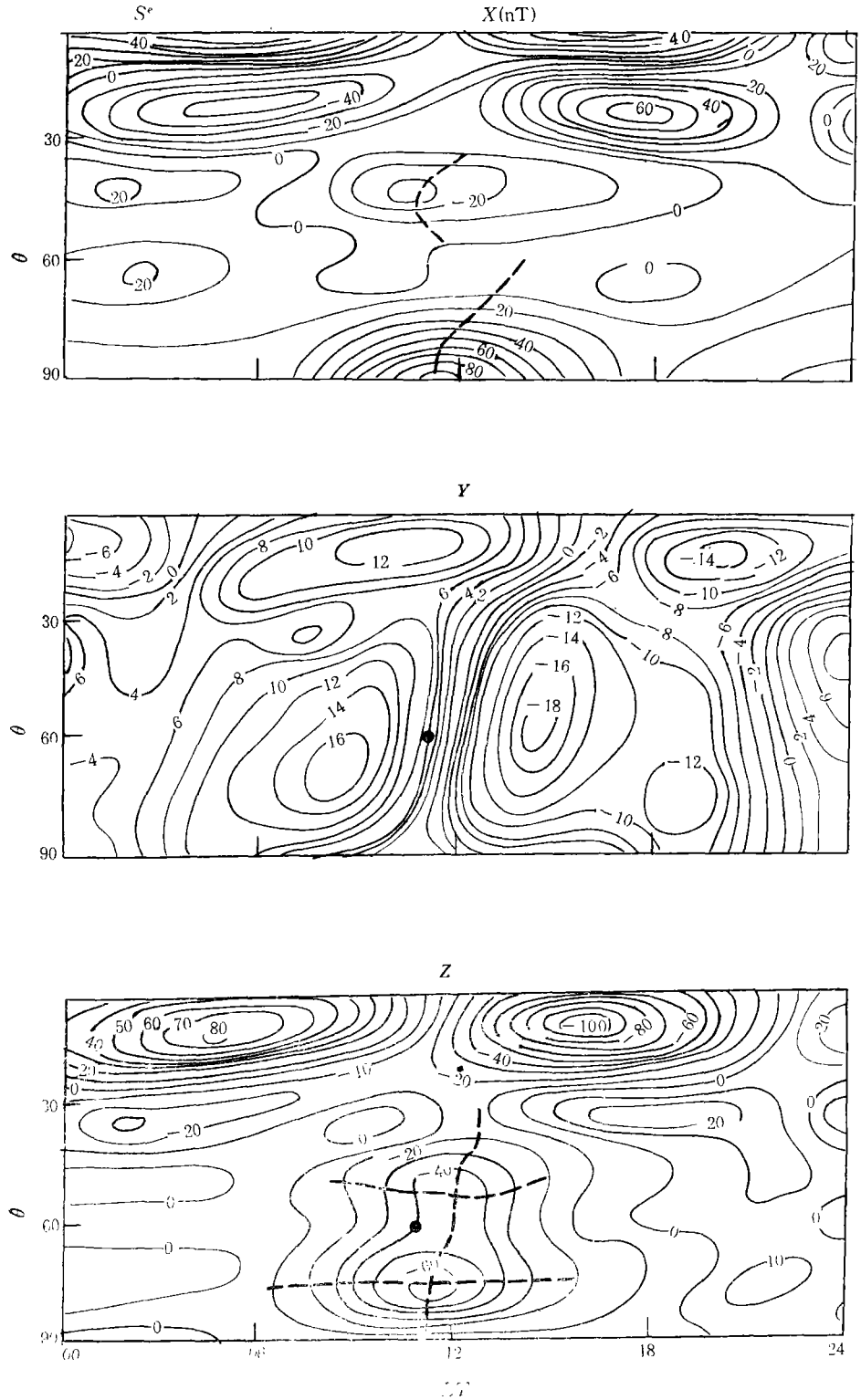



图 5 $S^e(=S_q^e + S^{pe})$ 电流体系产生的地面磁场(单位 nT)

Fig. 5 Magnetic field at the earth's surface produced by $S^e$ current system (unit nT)

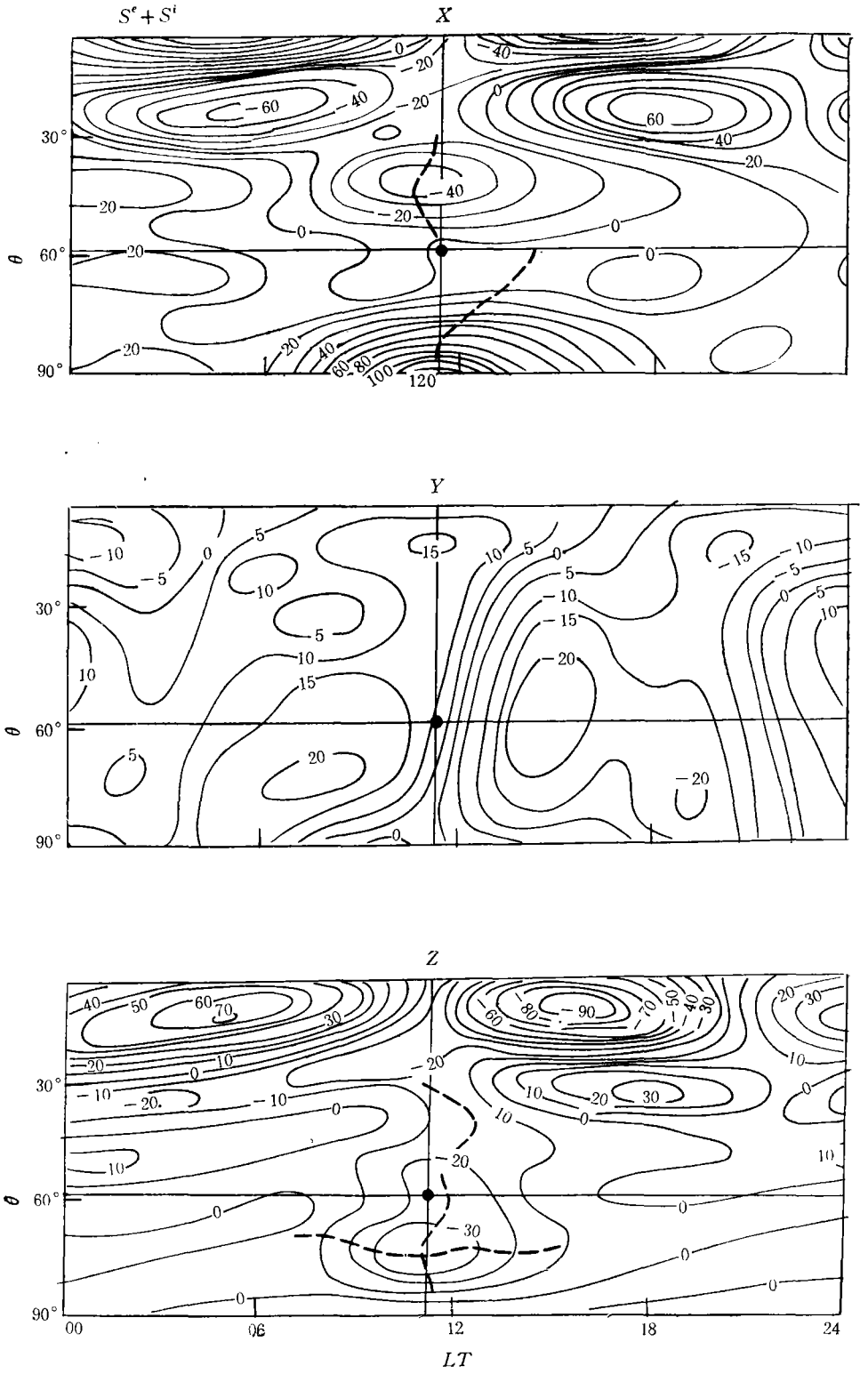



图 6　$S^e$ 和 $S^i$ 电流共同产生的地面磁场(单位 nT)

**Fig. 6** Magnetic field at the earth's surface produced by $S^e$ and $S^i$ together (unit nT)

密切关系，因而讨论每日的 $S_q^e$ 焦点是一个十分复杂的问题。此外，$S_q$ 变化还受着环电流、磁层电流的影响，$S_q$ 的形态有显著的经度差异[14]，所以应将 $S_q$ 与上述诸因素一起加以研究，才能更深刻地认识 $S_q^e$ 焦点变化的物理意义。

## 参　考　文　献


[1] Hasegawa, M., *J. Geophys. Res.*, Vol. **65**, p. 1437, 1960.
[2] 徐文耀，地震地磁观测与研究，第 **6** 卷，第 8 页，1985。
[3] Matsushita, S., J. D. Tarpley and W. H. Campbell, *Radio Sci.*, Vol. **8**, p. 963, 1973.
[4] Matsushita, S., Physics of Geomagnetic Phenomena, Academic Press, p. 301, 1967.
[5] Schäfer, K., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **40**, p. 755, 1978.
[6] Wagner, C.-U., D. Möhlmann, K. Schäfer, V. M. Mishin and M. I. Matveev, *Space Sci. Rev.*, Vol. **26**, p. 391, 1980.
[7] Suzuki, A. and H. Maeda, Data Book, World Data Center C2 for Geomagnetism, Kyoto University, 1978.
[8] Chapman, S. and J. Bartels, Geomagnetism, Oxford, p. 214, 1940.
[9] 高玉芬和祁燕琴，地球物理学报，第 **3** 卷，第 143 页，1981。
[10] Hibberd, F. H., *Aust. J. Phys.*, Vol. **34**, p. 81, 1981.
[11] Rajaram, M., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **45**, p. 573, 1983.
[12] Gupta, J. C. and S. Chapman, NCAR MS68-110, 1—156, NCAR, Boulder, 1968.
[13] Matsushita, S. and Wen-yao Xu, *J. Geophys. Res.*, Vol. **87**, p. 8241, 1982.
[14] 祁贵仲，地球物理学报，第 **18** 卷，第 104 页，1975。


# Estimation of $S_q^e$ Current System Focus by Means of Geomagnetic Data at Middle and Low Latitudes


Xu Wen-yao

(*Institute of Geophysics, Academia Sinica*)


## Abstract


The relationship of geomagnetic field at the earth's surface with $S_q^e$ current systems is analysed. It is pointed out that there exsist some differences between the true focus of the $S_q^e$ current system and the "apparent focus" determined by using $S_q^e$ variations in the geomagnetic field at the earth's surface. Practical approaches to estimating $S_q^e$ current focus by means of geomagnetic data are discussed and examined by using geomagnetic data during the period of IGY/C.