

中国地区地磁垂直分量日变幅的空间分布及高空电流体系焦点位置的移动*

高 玉 芬 邱 燕 琴

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文利用我国部分台站地磁垂直分量日变幅的资料,采用局部地区日变场的分析方法,研究了地磁垂直分量日变幅在中国地区的空间分布特征。结果表明,在局部地区地磁日变场的研究中,考虑经度影响是必要的,本文所用方法是适宜的;结果还表明,垂直分量日变幅的空间分布呈现出明显的季节变化、逐月变化及逐日变化性。若粗略地把磁静日垂直分量日变幅极大值所处的纬度视为 S_q 高空电流体系的焦点所对应的纬度,则此焦点纬度夏季最高,冬季最低,春秋居中,并显出明显的逐月及逐日变化性,在相邻的两个静日,焦点纬度的变化可达几度。

一、引 言

查普曼 (Chapman) 等人详细研究了地磁静日变化 S_q 的全球性时空分布及产生 S_q 的源,从而建立起一套比较成功的全球性地磁日变场分析方法并创立了地磁日变化大气发电机理论^[1,2]。他们指出,以太阳日为周期的地磁静日变化 S_q ,主要是由电离层 E 层中的涡旋电流体系引起的,它在地球内部的感应电流对地磁日变场也有贡献。在地球表面,其内外源场之比约为 1:3。高空电流体系的涡旋中心(即电流体系的焦点)约在纬度 30° 左右^[1,2]。电流体系焦点的位置是表征 S_q 场空间分布的一个重要特征点,它决定了 S_q 场空间分布规律的主要部分。在相应的焦点纬度上,水平分量 ($\delta H, \delta X$) 幅度最小,南北两侧位相相反;而垂直分量 (δZ) 幅度最大。图 1 中 S_q 周日波幅度的分布,除赤道附近“电射流”的影响外,明显地显示出 S_q 场的这一主要地理分布特征。 S_q 场除随地方时的变化之外,在空间上,主要依赖于纬度变化; S_q 场的变化与季节和太阳活动性有关。一般说来,在夏季和太阳活动高年幅度大,其位相也有差异^[1,2]。

无论是经典的舒斯特 (Schuster)、查普曼日变分析^[3],还是宾科娃 (Benkova)、普赖斯 (Price) 的方法^[3],多适用于全球 S_q 场,而对于局部地区,从方法到结果都还很不完善;另外,已有的结果主要是着眼于日变场的平均状态。这种平均状态的研究抓住了 S_q 场最本质最典型的特征,因而获得了极其重要的成果。很显然,无论这种典型方法多么成功,但毕竟不能包括日变场的全貌。查普曼和普赖斯等人一开始就注意到这一点,指出了

* 1979 年 11 月 5 日收到。

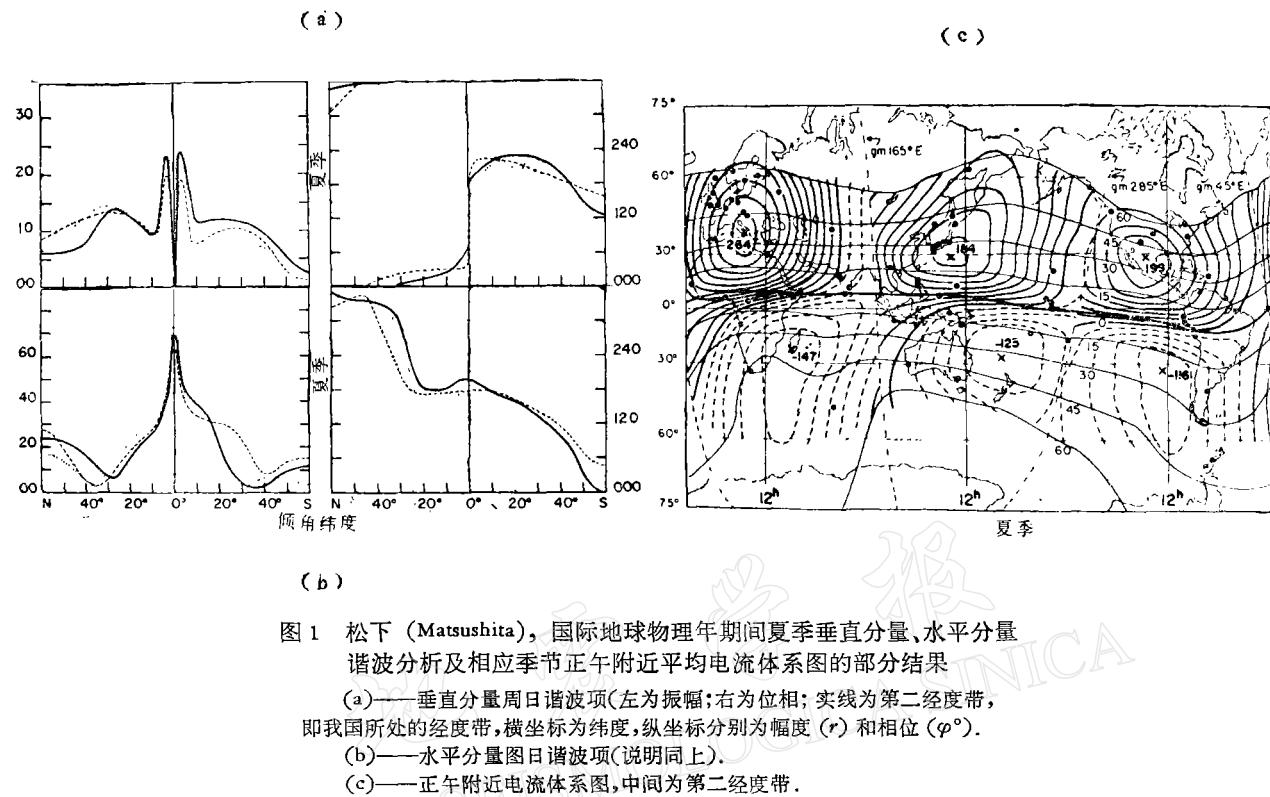


图 1 松下 (Matsushita), 国际地球物理年期间夏季垂直分量、水平分量
谐波分析及相应季节正午附近平均电流体系图的部分结果

(a)——垂直分量周日谐波项(左为振幅;右为位相;实线为第二经度带,
即我国所处的经度带,横坐标为纬度,纵坐标分别为幅度 (r) 和相位 (φ)).
(b)——水平分量周日谐波项(说明同上).
(c)——正午附近电流体系图,中间为第二经度带.

S_q 场“逐日变化”的存在及其重要性^[1,3]. 所谓“逐日变化”是指 S_q 场变化的逐日差异. 图 2 为我国不同纬度的台站在连续两个磁静日所记录到的日变, 图中明显地显示出这种逐

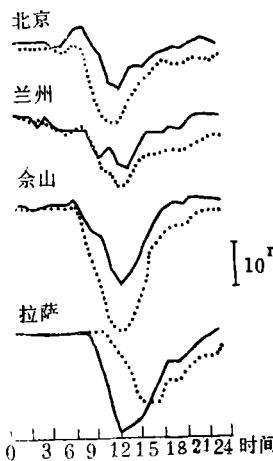


图 2 1960 年 11 月 7 日(实线), 8 日(虚线) 各台垂直分
量日变曲线(均为静日)

日差异,即在连续的两个静日,日变幅度和相位都有显著的变化. 从这里可以看出,如果说已有的经典研究结果所反映的是 S_q 场的典型的共性,则逐日变化所研究的是 S_q 变化的个性. 明确了这种共性和个性的关系,就不难了解 S_q 逐日变化的意义. 如前所述, S_q 场典型的平均状态的研究,揭示了高空电离层的发电机过程,那么 S_q 逐日变化个性的了解将会导致高空介质性质、运动及其电磁过程更加深入和细致的认识. 例如,长谷川 (Hasegawa) 由 S_q 场逐日分布的差异得出,即使在连续的静日, S_q 电流体系焦点的移动也可达 15° 之多^[3]. 此外在国内外所注目的地震磁现象的分析中,所指的异常,显然是指观测到的磁现象和特定时间段正常变化的差异,这里被用来做为判断标准的正常变化应该是相应时间段地磁场的个性,而不是平均状态. 因此,地磁日变场逐日变化的研究,将提供较准确的判断地震磁现象正常背景场的规律,对于曾在我国被采用的所谓“形态畸变”、“大范围幅度异常”等方法更有直接意义.

二、分析方法

1. 特征量及其描述方法

要得到日变场逐日变化的个性,无疑是相当困难的。这里包括有日变场特征量的选择和这一特征量个性的描述方法两个问题。其中后者尤为困难。本文选择日变幅度 R 做为日变场的一个特征量,目的是研究幅度 R 空间分布的逐日变化。我们在这里回避了逐日变化具体个性描述这一难点,而是研究 R 逐日变化对于平均状态的统计特性,即相对于平均典型状态的涨落性质。统计的涨落特性虽然不是具体的个性,但却已经是个性的整体描述,不同于经典的平均状态的共性。自然,这种用统计方法从整体上描述个性的方法也是逐步认识具体个性规律的可行途径。

除日变幅度 R 典型空间分布的分析方法之外,要确定空间各点 R 对典型分布的统计涨落也不是容易的。为此,我们又进一步选择 R 空间分布的极值点做为描述空间分布的一个特征量。极值选择,除了它从分布形态(曲线)来看的确是一个特征点外,还因为如前所述,日变幅 R 空间分布的极值, R_H 、 R_X 极小, R_Z 极大, 近似与高空日变电流体系的焦点位置相对应,而正是电流体系的焦点位置决定了日变化空间分布的主要性质。因此,选择极值点做为特征量既抓住了空间分布的主要部分,又可简化分析方法。

综上所述,本文分析工作的主要步骤为: (1) 确定日变幅 R 的典型分布和逐日分布; (2) 求出典型分布及逐日分布的空间极值点; (3) 研究逐日极点与典型极点的差异及其统计分布。

2. 确定日变幅 R 空间分布的分析方法

与经典方法不同,这里必须考虑日变幅 R 的二维分布,即除考虑纬度变化外,还要研究经度效应。为此,我们选用文献[4]中提出的分析局部日变场的“逐次近似方法”。目的是突出日变场的局部特性,以便较为准确地反映日变场空间分布的逐日差异。

将某一局部地区的台站,按经度分为若干组,每组包括分布在不同纬度上的几个台站。假定把台站按经度分为 A 、 B 两组,其台站分布如下:

组别	台站	纬度	幅值	全组平均经度
A	$A_i, i = 1, 2, \dots, n$	φ_{Ai}	$R(\varphi_{Ai})$	λ_A
B	$B_j, j = 1, 2, \dots, m$	φ_{Bj}	$R(\varphi_{Bj})$	λ_B

设该区域某两地纬度分别为 φ_p , φ_q , 且 $\varphi_p \neq \varphi_q$ 。第一步,利用两组合站日变幅的观测值及插值公式:

$$R(\varphi) = R(\varphi_i) + \delta_{ii}(\varphi - \varphi_i) + \delta_{iik}^2(\varphi - \varphi_i)(\varphi - \varphi_j) + \delta_{ijkl}^3(\varphi - \varphi_i)(\varphi - \varphi_j)(\varphi - \varphi_k) + \dots \quad (1)$$

分别计算出和纬度 φ_p , φ_q 相应的 $R_{\lambda A}(\varphi_p)$, $R_{\lambda B}(\varphi_p)$, 和 $R_{\lambda A}(\varphi_q)$, $R_{\lambda B}(\varphi_q)$ 。公式(1)中 i, j, k, l 必须是(或调整次序后)不超过 n 或 m 逐次递增 1 的整数。 δ , δ^2 , δ^3 ……为相应的各级均差,如其脚标已排成递增或递减的顺序,则:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{ij} &= \frac{R(\varphi_j) - R(\varphi_i)}{\varphi_j - \varphi_i} \\ \delta_{ijk}^2 &= \frac{\delta_{jk} - \delta_{ij}}{\varphi_k - \varphi_i} \\ \delta_{ijkl}^3 &= \frac{\delta_{jkl}^2 - \delta_{ijk}^2}{\varphi_l - \varphi_i} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

假定,在该区域中,日变场随经度的变化(C_λ)是线性的,其随纬度的变化率($C_{\lambda\varphi}$)也是线性的,则把

$$\left. \begin{aligned} C_\lambda(\varphi_p) &= \frac{R_{\lambda B}(\varphi_p) - R_{\lambda A}(\varphi_p)}{\lambda_B - \lambda_A} \\ C_\lambda(\varphi_q) &= \frac{R_{\lambda B}(\varphi_q) - R_{\lambda A}(\varphi_q)}{\lambda_B - \lambda_A} \\ C_{\lambda\varphi} &= \frac{C_\lambda(\varphi_q) - C_\lambda(\varphi_p)}{\varphi_q - \varphi_p} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

作为 C_λ 和 $C_{\lambda\varphi}$ 的一级近似,则利用 C_λ , $C_{\lambda\varphi}$ 的一级近似值,把每组各台的日变幅观测值 $R(\varphi_{Ai})$, $R(\varphi_{Bi})$ 分别校正到相应的平均经度 λ_A , λ_B 处,并利用校正后的值及公式(1)一(3)重复以上过程,如此反复计算,若我们的假设和方法确实反映了日变场的经度变化规律,则 C_λ 和 $C_{\lambda\varphi}$ 最后将收敛到一稳定不变的值.这个值,即为所求的日变幅 R 的经度变化系数.

应用所求的经度系数,可以把已知台站日变幅经经度校正后,归算到任一经度.把归算到某一经度上的各台日变幅利用公式(1)进行等间隔插值,并把这些插值点作为付氏展开的采样点,利用公式:

$$\left. \begin{aligned} R(\varphi) &= \sum_{n=1}^M b_n \sin \frac{n\pi\varphi_i}{l} \\ b_n &= \frac{2\Delta\varphi}{l} \sum_{i=1}^K R(\varphi_i) \sin \frac{n\pi\varphi_i}{l} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

把日变幅随纬度的变化表示为付氏级数.(4)式中 l 为所研究的纬度区间, φ_i 为采样点的纬度, $\Delta\varphi$ 为采样点间隔.这样,所研究区间某一经度上各点的日变幅 R 就可以用公式(4)表示出来.利用这个公式并结合经度系数,就可以求出所研究范围内任意一点的日变幅.

在具体计算中,根据台站的经度分布,把武汉、余山、郑州、红山、北京、长春作为一组;拉萨、兰州作为一组.重点分析 120°E 经度线上的规律.

三、资料的选取和结果

1. 资料 考虑在地震磁现象的研究中,垂直分量应用较广,台站数量较多,本文首先选取1976年我国八个台站除扰日之外所有垂直分量日变幅(即按地方时,每日最大值与最小值之差)做为分析的基础资料,选用的台站列于表1中,其纬度范围为 29.5°N — 44.5°N .

全部资料分为三个季节:冬季(1、2、11、12月);春秋季节(3、4、9、10月);夏季

表 1

台 站	地 理		地 磁	
	纬 度	经 度	纬 度	经 度
拉 萨	29°38'09.6"	91°02'10.5"	18°.6	161°.8
武 汉	30°31'39.2"	114°33'31.5"	19°.5	183°.6
余 山	31°05'48"	121°11'11"	20°.1	189°.2
郑 州	34°38'48"	113°34'48"	23°.28	183°.57
兰 州	36°05'12.9"	103°50'	25°.1	173°.8
红 山	37°25'6"	114°42'30"	26°.05	184°.52
北 京	40°02'22"	116°10'30"	29°.0	184°.2
长 春	43°49'38"	120°17'38"	32°.8	188°.2

(5、6、7、8月). 由于台站记录故障等原因, 造成部分资料的短缺. 资料选取情况列于表 2.

表 2

天 数 磁 情	季 节	冬	春、秋	夏
		静 日	18	15
通 日		67	75	74

2. 日变幅 R_z 的典型分布 利用上述资料和方法, 计算了 120°E 经度线上冬, 春秋, 夏三季静日 R_z 随地理纬度的平均分布, 结果绘于图 3, 表 3 给出了表征这种分布的三个主要参量. 其中 $R_{z_{\max}}$ 为 R_z 的极大值, φ_f 为极大值所对应的纬度, 第三项表示 R_z 随纬度的变化梯度. 从图 3 和表 3 可以看出 R_z 随纬度的空间分布有如下特征:

1) 冬、春秋和夏季三个季节, R_z 随纬度的变化都存在着一个极大值 $R_{z_{\max}}$. 在极大值两侧, 随纬度的升高或降低, R_z 趋于缓慢下降.

表 3

项 目 季 节	$\varphi_f(\text{N}^{\circ})$	$\Delta Z_{\max}(r)$	变化梯度 ($r/\text{度}$)
冬	29.5	18	0.5
春 秋	32.5	28	1.1
夏	34.5	27	1.0

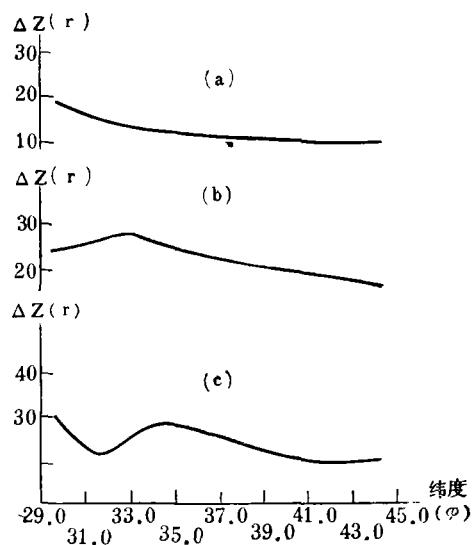


图 3 1976 年 120°E 经度线上磁静日
垂直分量日变幅随纬度的分布
(a)——冬季; (b)——春秋季; (c)——夏季.

2) R_z 的空间分布存在着明显的季节变化:

a. R_z 的极大值在冬季最小, 为 18° ; 春夏两季差别不大, 约为 28° .

b. R_z 极大值所对应的纬度在冬季最低, 夏季最高, 春秋季居中.

c. 在 R_z 极大值两侧, R_z 随纬度的变化梯度在冬季最小, 为 $0.5^\circ/\text{度}$, 其他两个季节差别不大, 约为 $1^\circ/\text{度}$.

应当指出的是, 第一, 以上结果只适用于 120°E 和 $29.5^\circ\text{--}44.5^\circ\text{N}$ 的范围; 第二, 夏季 R_z 随纬度的分布曲线, 在 32°N 及低于这一纬度的区域, 需待有更多的台站资料时进一步研究.

利用各季静日平均资料计算了 105°E 经度线上 φ_f 的位置对对应的 $R_{z_{\max}}$, 与 120°E 的结果同列于表 4 中. 从表中可以看出, 在这两条经度线上, 冬季的日变幅及夏季的 φ_f 的位置稍有差别.

表 4

		105°	120°
冬	$\varphi_f(\text{N}^\circ)$	29.5	29.5
	$\Delta Z_{\max}(r)$	16	18
春秋	$\varphi_f(\text{N}^\circ)$	32.5	32.5
	$\Delta Z_{\max}(r)$	28	28
夏	$\varphi_f(\text{N}^\circ)$	35.0	34.5
	$\Delta Z_{\max}(r)$	27	27

3) R_z 极大值逐月, 逐日变化的统计分布:

图 4 绘出了每月静日平均 φ_f 的分布图, 由于八月份资料不全, 没有计算在内. 从图中可以看出, φ_f 的位置存在着逐月变化, 在七月份达到最大值, 月与月之间的变化在几度范围之内.

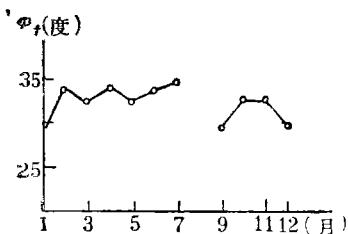


图 4 1976年各月静日 φ_f 的分布图

表 5 分别列举了各季几个连续静日 φ_f 位置的变化. 其中 qq 为国际磁静日, q 为国际次磁静日. 可以看出, 即使在连续的静日, φ_f 的移动也可达几度.

图 5 绘出了除扰日之外的 $R_{z_{\max}}$ 所处纬度的统计分析结果. 从图中可以看出, 每个季节都有比较集中的纬度, 这个纬度与图 3 和表 3 的结果一致: 冬季, $R_{z_{\max}}$ 对应的纬度集中出现在 $29.5^\circ\text{N}\text{--}31.5^\circ\text{N}$ 的范围内. 春秋季, $R_{z_{\max}}$ 所处的纬度集中出现

表 5

季 节	冬(11月)		春秋(3月)				夏(8月)				
	日期	23	24	19	20	21	22	11	12	13	14
项 目	磁 情	q	qq	q	q	qq	qq	q	qq	qq	q
ΔZ_{\max} 对应纬度		32.5	29.5	32.5	34.5	29.5	32.5	38.0	34.0	34.0	32.5

在 31.5°N — 33.5°N 之间。夏季, $R_{Z_{\max}}$ 所处的纬度集中出现在 33.5°N — 35.5°N 之间。我们暂且把这三个纬度区间称为峰值纬度。另外, 从图中还可以看出, 图形的分布是不对称的。冬季, 由于缺乏低纬度的资料, $R_{Z_{\max}}$ 的分布完全偏于峰值纬度的一侧(高纬一侧); 夏季, 明显地向低于峰值纬度的方向偏离; 春秋季, 向低于峰值纬度的位置偏离也较多。

四、结果的检验

为了检验以上的计算结果, 图 6 绘出了与图 3 相对应的在研究日变场空间分布时未考虑经度影响的情形。选取两图中的参量 φ_f 列于表 6 中。从这两个图和表 6 可以看出, 在研究日变场空间分布特点的过程中, 考虑经度影响和不考虑经度影响, 其结果是不同的。

通过以下的检验可以进一步比较这两个结果, 其方法是: (1) 比较所用的八个台的计算值和观测值; (2) 另选一些在经度和纬度上有代表性的台站, 比较它们的计算值和观测值; (3) 选取一些纬度相近而经度不同的台站, 比较它们考虑经度影响和不考虑经度影响的结果。其中 (1) 属于内部检验; (2), (3) 属于外 P 检验。

由于 1976 年资料较少, 故选取了 1978 年 2 月和 8 月的资料进行检验。表 7 给出的是前面分析中所使用的 8 个台站的计算值与观测值的比较。表 8 给出的是任选台站的计算值与观测值结果的比较。表 9 给出的是考虑经度影响与不考虑经度影响结果的比较。

表 6

项目		φ_f 的位置(北纬)(度)	
季 节	不考虑经度效应	120°E	
冬	30°.5	29°.5	
春 秋	29°.5	32°.5	
夏	30°.5	34°.5	

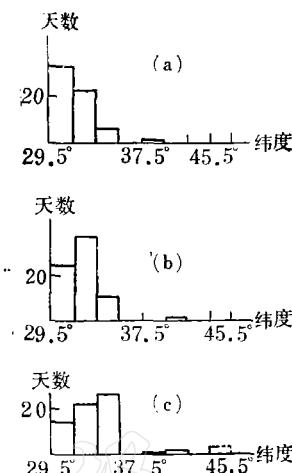


图 5 1976 年各季 $R_{Z_{\max}}$ 对应纬度的统计分布图

(a)——冬季;
(b)——春秋季;
(c)——夏季。

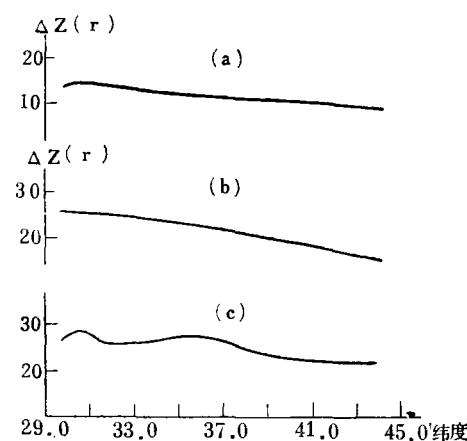


图 6 1976 年磁静日垂直分量日变幅随纬度分布图(不考虑经度影响)
(a)——冬季; (b)——春秋季; (c)——夏季。

从表 7 可以看出, 内部检验的效果比较好。偏差最大的拉萨台, 8 月份的误差只不过 3° (12%)。从表 8 可以看出, 对所有任选台站, 其相对误差一般都在 10% 的范围内。例如, 与 120°E 相差 45° 的喀什台, 2 月份的相对误差仅 5%。总起来说, 处于台站分布比较密的地区(如临沂, 昌黎)及日变场变化比较平稳的冬季, 计算结果更好些。另外, 从表

表 7

月份		台 站	拉 萨	兰 州	武 汉	余 山	郑 州	红 山	北 京	长 春
78年2月	实测值(r)	27.1	22.4	26.7	25.9	23.5	20.0	17.5	14.1	
	计算值(r)	29.1	22.4	26.8	25.7	23.4	20.0	17.5	14.3	
78年8月	实测值(r)	25.5	23.6	31.7	30.6	27.6	24.1	22.1	15.6	
	计算值(r)	28.7	23.6	32.1	29.8	27.2	24.4	21.9	15.7	

表 8

项 目	地 球 坐 标		实 测 值 (r)		计 算 值 (r)		绝 对 误 差 (r)		相 对 误 差 (%)	
	经 度 (E)	纬 度 (N)	2 月	8 月	2 月	8 月	2 月	8 月	2 月	8 月
台 站										
金 寨	115°53'4"	31°41'15"	24.1	28.6	25.1	22.4	1.0	6.2	4	22
天 水	105°54'12.4"	34°29'5.6"	26.9	25.0	24.0	25.7	2.9	0.7	11	3
临 沂	118°15'0.00"	35°03'00"	21.5	27.0	22.8	26.5	1.3	1.1	6	2
格 尔 木	94°47'40"	36°11'00"	24.1	28.8	23.0	21.6	1.1	7.2	5	21
昌 黎	119°02'32"	39°43'00"	19.2	22.0	17.4	22.5	1.8	1.5	8	7
喀 什	75°58'50"	39°32'00"	22.0	25.2	23.1	22.3	1.1	2.9	5	12

表 9

项 目	天 水		喀 什		格 尔 木	
	台 站	郑 州	北 京	兰 州	2 月	8 月
纬度相近台站						
时间(1978年)	2 月	8 月	2 月	8 月	2 月	8 月
实测值(r)	26.9	25.0	22.0	25.2	24.1	28.8
不考虑纬度效应计算值(r)	23.5	27.6	17.5	22.1	22.4	23.6
考虑经度效应计算值(r)	24.0	25.7	23.1	22.3	23.0	21.6

9可以看出,除8月格尔木台与兰州台的比较之外,所有考虑经度影响的结果比不考虑经度影响的结果更接近实测值.其中尤以2月份的喀什台和8月份的天水台显著.

通过以上检验,我们可以得出结论:在研究日变场局部特征中,考虑经度影响是必要的,由此得到的计算值是可靠的,从太阳日照的季节分布也可说明图3所反映的 R_z 的空间分布比图6更接近真实状态.

五、结 论

通过以上检验可知,本文所得到的垂直日变幅 R_z 的分布规律比较真实地反映了地磁日变场本身的变化.因此,在局部地区日变场的研究中,考虑经度影响是必要的,本文所采用的方法是适宜的.

如前言所述,日变幅 R_z 的空间分布极大值 $R_{z_{max}}$ 的位置近似与日变化的电流体系焦

点的位置相对应.因此,本文对 $R_{Z_{\max}}$ 所得到的季节变化,逐月变化及逐日变化的特点,主要反映了 S_q 电流体系焦点的变化.即 S_q 电流体系的焦点位置存在着明显的季节变化及逐月逐日变化.冬季电流体系焦点纬度最低,夏季最高,春秋季居中,在连续的两个静日,焦点纬度可移动几度.但对于个别天,则有可能是具体扰动事件的结果.

本文所有结果,特别是日变幅 R_z 极大值位置逐日对平均状态的涨落的统计分析,为地震磁现象的研究提供了更详细的背景资料.

最后应指出,上述分析尚存在着一些不足.其一是台站布局疏密不均,西部台站较少,缺乏纬度较低的台站;其二,虽然从统计意义上讲,本文的结果主要是反映了日变化的逐日特性,但个别日期仍可能包含扰动的影响.

参 考 文 献

- [1] S. Chapman and Bartels, *Geomagnetism*, Oxford at the Clarendon Press 1940.
- [2] S. Matsushita and Wallace H. Campbell, *Physics of Geomagnetic Phenomena*, Academic Press New York and London, 1967.
- [3] A. T. Price and G. A. Wilkins, New Methods for the analysis of geomagnetic fields and their application to the S_q field of 1932—33, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A, 256, 31—98, 1963.
- [4] 祁贵仲,局部地区地磁日变分析方法及中国地区 S_q 场的经度效应,地球物理学报, 18 2, 1975.
- [5] M. Hasegawa. On the position of the focus of the geomagnetic current system, *J. Geophys. Res.*, 65, 1437—1447, 1960.
- [6] B. M. 扬诺夫斯基,地磁学(中译本),地质出版社, 1959.

ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE DIURNAL VARIATION OF THE GEOMAGNETIC VERTICAL COMPONENT IN CHINA AND THE MOVEMENT OF THE FOI OF UPPER ATMOSPHERE CURRENT SYSTEM

GAO YU-FEN QI YAN-QIN

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

This paper deals with the study of the spatial distribution of the amplitude of diurnal variation of geomagnetic vertical component in China, based on the data recorded at some Chinese geomagnetic stations, using the method of analysis of solar daily variation of geomagnetic field in local regions. The results show that it is necessary to take into account the longitudinal effect in local regions and that the method used here seems to be appropriate. It also shows that the spatial distribution of amplitudes of diurnal variation of the vertical component displays noticeable seasonal variation, month-to-month and day-to-day. If the latitudes of the maximum amplitudes of variation of the vertical component on geomagnetic quiet days are roughly taken as the latitudes corresponding to the foci of S_q overhead current system, we can see that these latitudes of foci become highest in summer, lowest in winter and medium height in Equinoxes, displaying conspicuously monthly and daily variations. For two successive geomagnetic quiet days the latitudes of foci may vary several degrees.