0254-6124/2012/32(3)-321–15 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Feng Yan, An Zhenchang, Mao Fei, Sun Han, Jiang Yong, Liu Shijun. Study on external weak magnetic field during magnetic quiet periods over Chinese mainland. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(3): 321-335

磁静日期间中国大陆地区外源弱磁场研究 *

冯 彦[1] 安振昌[2] 毛 飞[3] 孙 涵[4] 蒋 勇[1] 柳士俊[5]

1(南京信息工程大学数理学院 南京 210044)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

3(中国气象科学研究院 北京 100081)

4(国家卫星气象中心遥感应用试验基地/广西气象减灾研究所 南宁 530022)

5(中国气象局培训中心 北京 100081)

摘 要 利用第四代地磁场综合模型 CM4, 研究了中国大陆地区 1960－2000 年磁静日期间地磁外源弱磁场的变化情况, 计算并分析了外源场中的电离层感应场、环形场以及磁层感应场的分布和变化. 结果显示, 北向分量 X 的磁层感应场强度总体呈先增加后减少的趋势, 共减少了约 7.3 nT; 东向分量 Y 的磁层感应场强度呈先减少后增加的趋势, 共增加了约 0.8 nT; 垂直分量 Z 的磁层感应场强度呈先增加后减少的趋势, 共增加了约 5.5 nT. 三个分量的电离层感应场以及环形场变化幅度很小, 其分布在 1960－1970 和 1970－1980 年, 1980－1990 和 1990－2000 年呈现正负互相变换的现象, 认为该现象可能与太阳 11 年活动周期有关. 最后对弱磁场随时间变化的结果进行了分析说明.

关键词 CM4 模型, 电离层感应场, 磁层感应场

中图法分类号 P 353

Study on External Weak Magnetic Field During Magnetic Quiet Periods Over Chinese Mainland

FENG Yan[1] AN Zhenchang[2] MAO Fei[3] SUN Han[4] JIANG Yong[1] LIU Shijun[5]

1(*The College of Mathematics and Physics, Nanjing University of Information and Technology, Nanjing* 210044)

2(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

3(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081)

4(*Remote Sensing Application and Experiment Station of National Satellite Meteorological Center/ Guangxi Meteorological Disaster Mitigation Institute, Nanning* 530022)

5(*Training Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

Abstract The fourth generation comprehensive model of magnetic field CM4 was used to research the variation of external weak field in magnetically quiet periods over Chinese mainland during

* 国家高技术研究发展计划课题研究专项资助 (2007AA12Z328)

2010-06-12 收到原稿, 2011-10-19 收到修定稿

E-mail: xxxfengyanxxx@sina.com

1960−2000. The distribution and variation of ionospheric induced field, toroidal field and magnetospheric induced field separated from the external field were also calculated and analyzed. Results show that in terms of lithospheric induced field, component X's trend of variation was increased firstly, then decreased with time, the amplitude is about 7.3 nT; Component Y's trend of variation was initially decreased, and increased with time, the amplitude is about 0.8 nT; Component Z's trend of variation was increased and then decreased with time, the amplitude is about 5.5 nT. The variation amplitude of toroidal field and magnetospheric induced field of three components are relative small. Their distribution during 1960−1970 and 1970−1980, 1980−1990 and 1990−2000 show an interesting phenomenon that areas of positive and negative values exchanged each other, which may has something related with solar 11 years' activities. Finally, analysis and explaination of these results were given.

Key words CM4, Ionospheric induced field, Magnetospheric induced field

0 引言

地磁场的外源场源于中性大气层以外的磁场源, 产生于电离层场和磁层场中的电流体系, 主要包括电离层场、电离层感应场、磁层场、磁层感应场等部分. 外源场随时间变化剧烈, 并在地球内部产生感应电流, 这些感应电流产生的较为微弱的 "外部感应场" 可通过装载于卫星上的现代化测量仪器进行测量, 其强度不到地球磁场总强度的 0.5%. 由于卫星高度约为 400∼750 km, 该高度测量的数据包含位于电离层 F 区域 (120∼400 km) 的耦合电流, 该电流会产生一个较微弱的环形磁场, 并认为是地磁场外源场的一部分 [1].

对外源场已进行了许多研究 [2−7], 但是在内外源场分离, 外源场及其感应场的分布特征等方面, 尽管对其进行了理论分析 [8], 实际研究中还存在一些困难. 例如, 地面台站分布不均; 卫星完成一条轨道运行约需 90 min, 几天才能完成一次覆盖全球的观测, 难以进行全球范围的电离层场和磁层场的同步观测; 环形电流存在于卫星轨道和电离层 E 区域之间的 F 区域, 较难估算.

针对以上问题, 20 世纪 90 年代, 美国国家宇航局戈达德飞行中心 (NASA/GSFC) 和丹麦空间研究所 (DSRI) 联合开发了一种地磁场建模的新方法, 即地磁场综合模型 (Comprehensive Model of Geomagnetic Field, CM)[9], 从 1993 年到 2004 年, 分别建立了 CM1, CM2, CM3 和 CM4[10−13]. CM 系列模型解决了一些关键性问题. 首先, 外源场的快速变化主要发生在磁扰期间, 而 CM 模型主要依靠各种指数 (例如磁暴指数 Dst、地磁活动指数 Kp 等) 以选择磁静时数据, 这样可将快速变化影响减至最低, 并具有两方面的优点, 一方面, 快速变化场相对于磁层场是以偶极子的形式存在的, 它的变化可用 Dst 指数估算; 另一方面, 磁层、电离层的所有区域相对于日地 (太阳地球) 线固定. 其次, 基于磁静时电离层和磁层场的空间特征, 电离层 E 区域的场源可通过 110 km 高度的片电流形式模拟估算, 并可利用较少的参数及合适的坐标系统表示. 最新的 CM4 模型利用 4 种卫星数据以及若干地面台站数据建模, 通过卫星获取近地空间的各种场源数据, 并进行参数化及协同估算各种场源, 通过迭代重加权最小二乘法 (iteratively reweighted least squares) 进行分层计算, 最后得到 7 种磁场模型值 (内源场中的地核场, 地壳场和外源场中的磁层场, 磁层感应场, 电离层场, 电离层感应场, 环形场). CM4 模型适用于磁静日期间, 适用时间为 1960−2002 年.

对于外源感应场, 由于不能从内源场进行识别, 因此, 利用内源场和外源感应场随时间变化的差异这一特点, 通过时间模式表示外源诱导场. CM4 与 CM3 一样, 不再单独依靠其外源诱导场估算外源感应场, 而认为感应场与由固体地球的电流体系所产生的诱导场成一定比例, 该比例的发现确认了外源感应场同外源诱导场之间的耦合关系, 从而简化了模型.

对于电离层 F 区域的环形电流及磁场, CM1 和 CM2 由于数据和建模技术等原因, 并未考虑. 随着数据处理技术的提高 (采样率) 以及建模技术的完

善 (截断阶数), 在假定耦合电流为径向电流的前提下, 考虑和估算了该磁场. CM4 使用了 CHAMP 卫星的标量数据、Ørsted 卫星的标量和矢量数据、部分 Magsat 卫星数据以及每月磁扰最小期间的最靠近 01:00 LT 的台站时均值 (OHMS), 这些都轻微地修正了环形场的模型值. 考虑到 Magsat 和 Ørsted 卫星并没有在相同的高度和局部时对 F 区域采样, 因此, 模型参数化时不要求相应的耦合电流为径向电流 [1].

关于外源场的各个电流体系及其产生的感应磁场已有相关研究. Maus 和 Olsen[14] 建立了一维电导率模型, 将扰动 Dst 指数进一步分为 $E_{\rm st}$(外源场指数) 和 $I_{\rm st}$(感应场扰动指数), 并讨论了该方法在地磁场建模中对外源场及感应场进行参数化的优点, 为建立更为准确的地磁外源场模型奠定了基础. 由于地磁外源场主要源于磁层电流与电离层电流, 这些电流体系变化形态复杂, 会对外源场产生时空影响. 有学者利用卫星测量数据, 针对这些电流与各种外源场的相互作用, 进行了模型研究 [15−16], Olsen 从 Magsat[17] 卫星数据中估算了中低纬度上的电离层 F 区域电流, Luhr 和 Maus[18] 利用 CHAMP 卫星数据直接观测了电离层 F 区域的发电机电流以及赤道电集流的空间结构.

中国基于台站和卫星数据对电离层场以及磁层场有过较多的研究. 文献 [19−22] 利用不同地区电离层台站数据对 f_0F_2 (F_2 层临界频率) 进行了相关研究. 文献 [23] 利用多个电离层垂测站的数据和 IGS-TEC 数据资料, 结合日地空间环境指数, 分析了 2009 年日全食期间中国地区电离层参量的变化特征. 有研究通过卫星数据对电离层和磁层进行分析, 例如根据探测一号 (TC-1) 卫星的观测, 认为来自电离层的尾向流对磁场 B_y 分量有重要的影响, 能够显著增强磁场 B_y 分量的强度. 来自电离层的尾向流对近地磁尾动力学过程有着重要的影响 [24]. 利用 1997 和 1998 年的地面观测数据和 WIND 卫星在弓激波上游对行星际磁场和太阳风参数的观测数据, 胡红桥等 [25] 定量研究了午后高纬极光强度与太阳风–磁层耦合函数之间的相关性.

姚丽等 [26] 同样利用位于向阳面正午两侧的 GOES-10 和 GOES-12 卫星观测数据发现, 激波作用于磁层时靠近清晨的磁场变化表现出简单压缩效应, 而靠近黄昏的磁场变化则显然不同, B_x 分量减弱, B_y 分量几乎减为零, B_z 分量则显著增强.

尽管对中国地区地磁场的外源场已有相关研究, 例如徐文耀 [27] 从能量守恒原理出发, 讨论了太阳风–磁层–电离层耦合过程的能流路径和能量收支的定量关系问题. 但是由于空间电流较为复杂, 对于地磁场的外源场及其随时间变化的研究较少, 尤其是磁场较弱的外源感应场和环形场, 因此有必要对中国大陆地区的弱磁场进行分析. 本文利用 CM4 模型分别计算了 1960 (1960 年 1 月 1 日 00:00 LT, 冬季, 下同), 1970, 1980, 1990 和 2000 年中国大陆地区水平面上 (高程为 0) X, Y, Z 分量的电离层感应场、环形场以及磁层感应场的分布形态, 及其在各年代的变化情况.

1　数据和方法

1.1　模型数据

使用了 CM4 模型, 该模型基于 1960−2000 年的 POGO 和 CHAMP 卫星在中国大陆地区的标量数据 (总强度 F), 以及 Magsat 和 Ørsted 卫星在中国大陆地区的标量 (F) 和矢量数据 (北向分量 X、东向分量 Y、垂直分量 Z). 在 4 种卫星数据中, POGO 和 Magsat 标量数据与 CM3 中使用的相同. 为了提高地壳场模型的精度, CM4 中重新选取了 Magsat 卫星的矢量数据. 在磁静期间, 观测时在 $Kp \leqslant 1$ 以及之前以 3 h 为间隔的 $Kp \leqslant 2$ 期间, 进行了姿态精度为 $20''$ 的数据选取. Ørsted 和 CHAMP 卫星数据选用的是磁静期间 $Kp \leqslant 1^+$ 以及之前 3 h 为间隔的 $Kp \leqslant 2$ 的数据. Dst 指数的选择范围为 $-20 \sim 20$ nT.

为了减小模型误差, 根据其与 CM3 的残差, 筛选所有的卫星数据: 当 X, Y, Z 和 F 分量的残差分别大于 100, 100, 50 和 40 nT 时即予以剔除 [13].

1.2　模型参数化

1.2.1　电离层场及其感应场的参数化

由电离层电流产生的地磁变化在磁地方时相对固定, 但会受到季节、太阳周期、地球主磁场等影响而产生变化. 真实的电离层电流可以通过高度 $h = 110$ km 处的等效片电流进行近似估算, 它能在电流分布外部产生相同的磁场. 由于这些磁场随时间变化, 在地球内部会产生相应的感应电流, 又由于难以在场源电流流动区域进行测量, 因此, 可将这些场表示为位势函数的梯度, 该位势函数反映了单个空间谐

和场, 并由单个季节或日周期调整. 由于推理过程较多, 这里只给出最终表达式.

对于 $a \leqslant r \leqslant a+h$ 和 $r \geqslant a+h$ 区域的电离层场及其感应场位势可用下式表示:

$$V_{\rm ion}(t,t_{\rm mut},L)={\rm Re}\Big\{\sum_{s=-2}^{2}\sum_{p=0}^{4}\sum_{l=p-1}^{p+1}\sum_{k=\max(1,|l|)}^{|l|+40}\tilde{\varepsilon}^{l}_{ksp}\times \sum_{n=1}^{60}\sum_{m=-\min(n,12)}^{\min(n,12)}[(d^{lm}_{kn,{\rm e}})^{*}S^{m}_{nsp,{\rm e}}(t,t_{\rm mut},L)+ (f^{lm}_{knsp})^{*}S^{m}_{nsp,{\rm i}}(t,t_{\rm mut},L)]\Big\}. \tag{1}$$

$$V'_{\rm ion}(t,t_{\rm mut},L)={\rm Re}\Big\{\sum_{s=-2}^{2}\sum_{p=0}^{4}\sum_{l=p-1}^{p+1}\sum_{k=\max(1,|l|)}^{|l|+40}\tilde{\varepsilon}^{l}_{ksp}\times \sum_{n=1}^{60}\sum_{m=-\min(n,12)}^{\min(n,12)}[(f^{lm}_{knsp})^{*}+(z^{lm}_{kn})^{*}]\times S^{m}_{nsp,{\rm i}}(t,t_{\rm mut},L). \tag{2}$$

式中, a 为地球平均半径 (6371.2 km); r 为测点到地心的距离; ${\rm Re}\{\cdot\}$ 为表达式的实部; t 为世界时; $t_{\rm mut}$ 为磁世界时; $\boldsymbol{L}$ 为位置矢量;

$$f^{lm}_{knsp}=q^{mm}_{nnsp}d^{lm}_{kn,{\rm e}},$$
$$z^{lm}_{kn}=-\Big(\frac{n}{n+1}\Big)\Big(\frac{a+h}{a}\Big)^{n+2}d^{lm}_{kn},$$

这里

$$d^{lm}_{kn,{\rm e}}=\Big(\frac{a}{a+h}\Big)^{n-1}d^{lm}_{kn},$$

d^{lm}_{kn} 通过标准球谐函数转换得到; QD 场 (准偶极场) 的电离层展开系数 $\tilde{\varepsilon}^{l}_{ksp}$ 表示为 $\tilde{\varepsilon}^{l}_{ksp}=\tilde{\varepsilon}^{l}_{ksp}(1+NF_{10.7})$; $(f^{lm}_{knsp})^{*}=f^{-l-m}_{knsp}$, 转换下同, $F_{10.7}$ 为太阳辐射通量指数, Olsen[28] 估算出 $N=14.85\times10^{-3}(10^{-22}{\rm W\cdot\,m^{-2}\cdot Hz^{-1}})^{-1}$;

$$S^{m}_{nsp,{\rm e}}(t,t_{\rm mut},L)=a\Big(\frac{r}{a}\Big)^{n}P^{m}_{n}(\cos\theta_{\rm d})\cdot \exp[{\rm i}\,(m\phi_{\rm d}+\omega_{\rm s}st+\omega_{\rm p}pt_{\rm mut})],$$

$$S^{m}_{nsp,{\rm i}}(t,t_{\rm mut},L)=a\Big(\frac{a}{r}\Big)^{n+1}P^{m}_{n}(\cos\theta_{\rm d})\cdot \exp[{\rm i}\,(m\phi_{\rm d}+\omega_{\rm s}st+\omega_{\rm p}pt_{\rm mut})],$$

式中下标 e 为外源场, i 为其感应场; $\theta_{\rm d}$ 为偶极余纬度, $\phi_{\rm d}$ 为偶极经度; 基本的季节角频率 $\omega_{\rm s}=2\pi\,{\rm rad\cdot a^{-1}}$, 其相关的波数为 s, 每日角频率 $\omega_{\rm p}=\frac{2\pi}{24}\,{\rm rad\cdot h^{-1}}$, 其相关波数为 p.

1.2.2 环形场的参数化

电离层 F 区域存在由 F 区域极向电流 J 产生的环形场 B, 该磁场强度很小, 通过 Magsat 和 Ørsted 卫星可测得, 相对于地面为外源场有

$$B=\begin{pmatrix}0\\ \dfrac{1}{\sin\theta}\dfrac{\partial\Phi}{\partial\phi}\\ -\dfrac{\partial\Phi}{\partial\theta}\end{pmatrix}. \tag{3}$$

其中环形标量函数通过 Φ 和 r 表示, 有

$$\Phi(t,L)={\rm Re}\Big\{\sum_{n,m,s,p}\phi^{m}_{nsp}(r)T^{m}_{nsp}(t,\theta_{\rm q},\phi_{\rm q})\Big\}. \tag{4}$$

其中,

$$T^{m}_{nsp}(t,\theta_{\rm q},\phi_{\rm q})=Y^{m}_{n}(\theta_{\rm q},\phi_{\rm q})\exp[{\rm i}\,s\phi_{\rm s}(t)]\cdot \exp[{\rm i}\,p\phi_{\rm p}(t_{\rm mut}(t))], \tag{5}$$

$$\phi^{m}_{nsp}(r)=\Big(\frac{R}{r}\Big)\sum_{j}\phi^{m}_{nspj}\frac{\rho^{j}}{j!}. \tag{6}$$

式 (5) 为 QD 场对称基本函数, $Y^{m}_{n}(\theta_{\rm q},\phi_{\rm q})$ 为 QD 坐标系下 n 阶 m 次的施密特准正交表面球谐函数; $\phi_{\rm s}$ 为季节时角度, 其为磁全球时 t 的函数; $\phi_{\rm p}$ 为每日时间角度, 其为磁地方时 $t_{\rm mut}$ 的函数. 式 (6) 中 $\rho=(r-b)/R$, R 为参考半径, b 为地球长轴长度, 当 $j=0$ 和 1 时被认为是 QD 区域项, Magsat 和 Ørsted 卫星的矢量数据认为是 ϕ^{m}_{nspj} 的函数.

由于 F 区域的电流所产生的环形场为非位势场, 故影响了其外插精度. 然而该模型在 Magsat 卫星 350~500 km 与 Ørsted 卫星 675~850 km 的高度内适用.

1.2.3 磁层场及其感应场的参数化

磁层场的主要特征为随着环电流强度、季节和太阳风参数的变化而变化, 并且在磁地方时相对稳定. 磁层场的主要影响源是磁层尾、磁层顶和环电流综合体. 磁层场可以通过位势函数的梯度表示, 与电离层场的表达式类似.

磁层及其感应场的位势表达式如下:

$$V_{\rm mag}(t,t_{\rm mut},L)={\rm Re}\Big\{\sum_{s=-2}^{2}\sum_{p=0}^{5}\sum_{l=p-1}^{p+1}\sum_{k=\max(1,|l|)}^{|l|+K(p-l)}\mu^{l}_{ksp}\ [S^{l}_{ksp,{\rm e}}(t,t_{\rm mut},L)+(q^{ll}_{kksp})^{*}S^{l}_{ksp,{\rm i}}(t,t_{\rm mut},L)+$$

$$\sum_{s=-2}^{2}\sum_{p=0}^{5}\sum_{l=p-1}^{p+1}\sum_{k=\max(1,|l|)}^{1}\mu^{l}_{ksp,Dst}\times$$

$$Dst[S^{l}_{ksp,\mathrm{e}}(t,t_{\mathrm{mut}},L)+$$

$$(q^{ll}_{kksp,Dst})^{*}S^{l}_{ksp,\mathrm{i}}(t,t_{\mathrm{mut}},L)]\Big\}. \quad (7)$$

其中, l 与较窄的带宽 p 相关, 最大值 k 为补偿常数, K 为局部时与非局部时的函数. 参数化过程中存在一个转换矩阵 $\boldsymbol{Q}$, 用于相同频率下磁层驱动信号和感应驱动信号的相互转换, s, p 和 Dst 分别对 $\boldsymbol{Q}$ 进行索引.

2　电离层感应场、环形场及磁层感应场的时空变化特征

2.1　电离层感应场

1960 年 X,Y,Z 分量在中国大陆地区的电离层感应场分布如图 1 所示.

由图 1 可以看出, 1960 年中国大陆地区 X 分量的电离层感应场强度有正有负, 强度随经度增加, 从 −2 nT 变为 1 nT 左右, Y 分量几乎都为正值, 强度随经度增加, 从 0 nT 变为 7 nT 左右, Z 分量除黑龙江和吉林大部分区域外, 其他均为负值, 强度随经度增加, 从 −3.5 nT 变为 0 nT 左右.

由于 1960−2000 年电离层感应场三个分量变化相对较小, 为研究其变化, 将后一年代的网格值减去前一年代的网格值, 例如用 1970 年的网格值减去 1960 年的网格值, 并绘图以分析其随时间变化的趋势和强度, 结果如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 1960−2000 年 X, Y, Z 分量以 11 年为间隔的强度变化都小于 0.3 nT, 因此, 只分析其分布趋势. 通过观察发现, 各分量不同年代的电离层感应场分布呈现正负区域互换的现象, 分布只是略有差异. 1960−1970 年 X 分量在中国东北部呈负值, 中西部为正值, 强度变化随经度增加而减少 (见图 2a), 1970−1980 年则与之相反 (见图 2b); 1980−1990 年的强度变化与 1960 年电离层感应场分布类似, 随经度增加而先增加后减少 (见图 2c), 1990−2000 年则与之相反 (见图 2d). Y 分量 1960−1970 年在中国大陆绝大部分区域为正值, 在江西附近有一正极值, 强度变化随经度增大而增加 (见图 2e), 1970−1980 年则与之相反 (见图 2f);

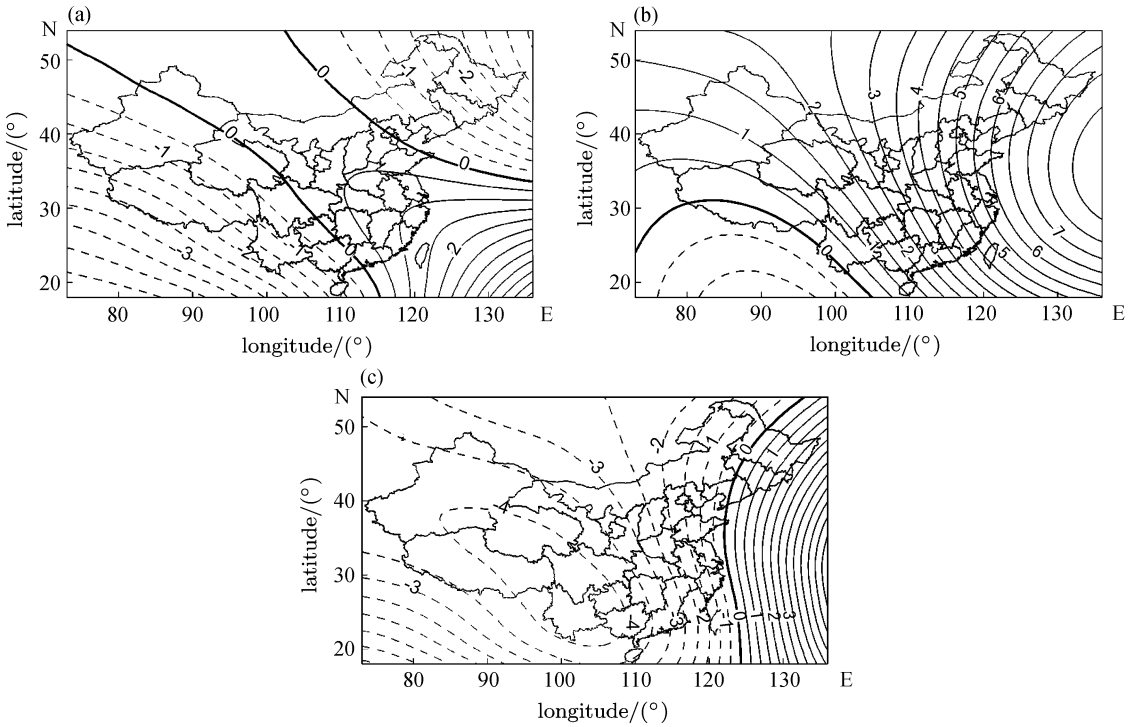
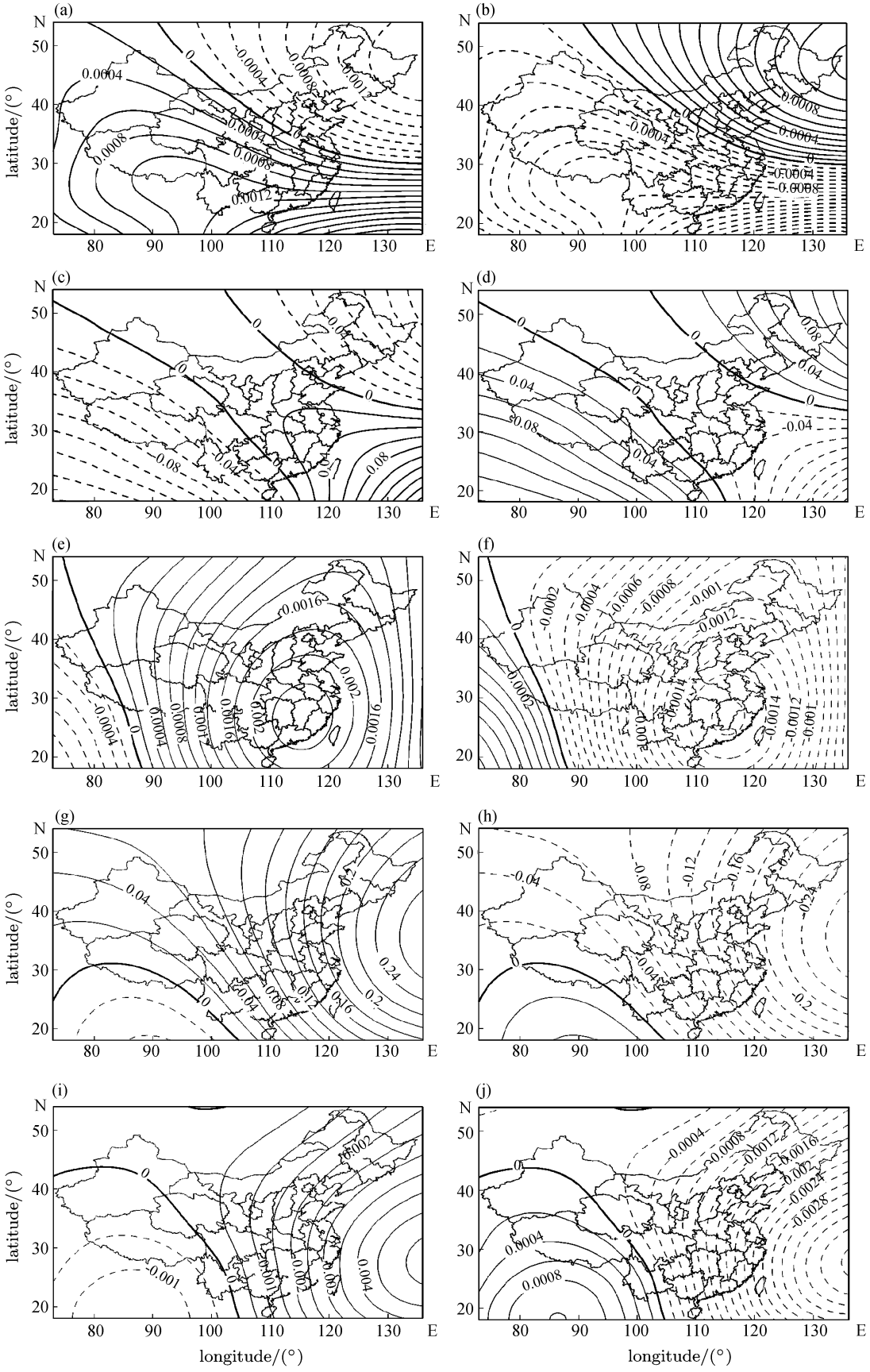


图 1　1960 年中国大陆地区 X (a), Y (b), Z (c) 分量的电离层感应场分布 (单位 nT)

Fig. 1　Distribution charts of ionospheric induced field of component X (a), Y (b), Z (c) over Chinese mainand in 1960 (unit nT)


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)
(j)
N
E
latitude/(°)
longitude/(°)
20
30
40
50
80
90
100
110
120
130

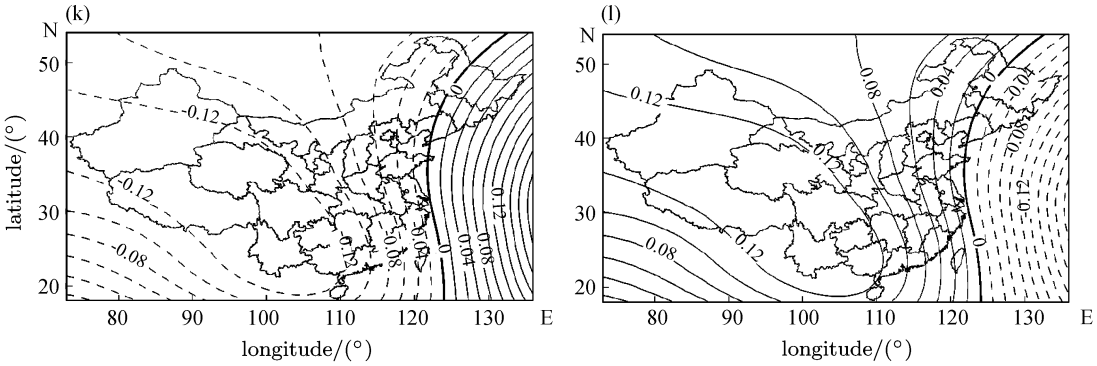


图 2　1960−2000 年中国大陆地区 X (a∼d), Y (e∼h), Z (i∼l) 分量的电离层感应场差异 (单位 nT)

Fig. 2　Difference charts of ionospheric induced field of component X (a∼d), Y (e∼h), Z (i∼l) over Chinese mainland during 1960−2000 (unit nT)

1980−1990 年在中国大陆地区几乎都为正值, 强度变化随经度增大而增加 (见图 2g), 1990−2000 年则与之相反 (见图 2h). Z 分量在 1960−1970 年除西部部分区域外, 均为正值, 强度变化随经度增大而增加 (见图 2i), 1970−1980 年则与之相反 (见图 2j); 1980−1990 年 Z 分量除中国东北部分区域外, 其他地区均为负值, 强度变化随经度增大而增加 (见图 2k), 而 1990−2000 年则与之相反 (见图 2l). 产生这种现象的原因可能与太阳 11 年周期活动有关.

2.2　环形场

1960 年 X, Y, Z 分量在中国大陆地区的环形场分布如图 3 所示.

由图 3 可见, X 分量在中国大陆除云南、广西等地区外, 其他地区的环形场强度均为正值, 强度随纬度增加, 从 −1 nT 变为 4 nT 左右, Y 分量都为正值, 强度随经度增加, 从 11 nT 变为 4 nT 左右, Z 分量

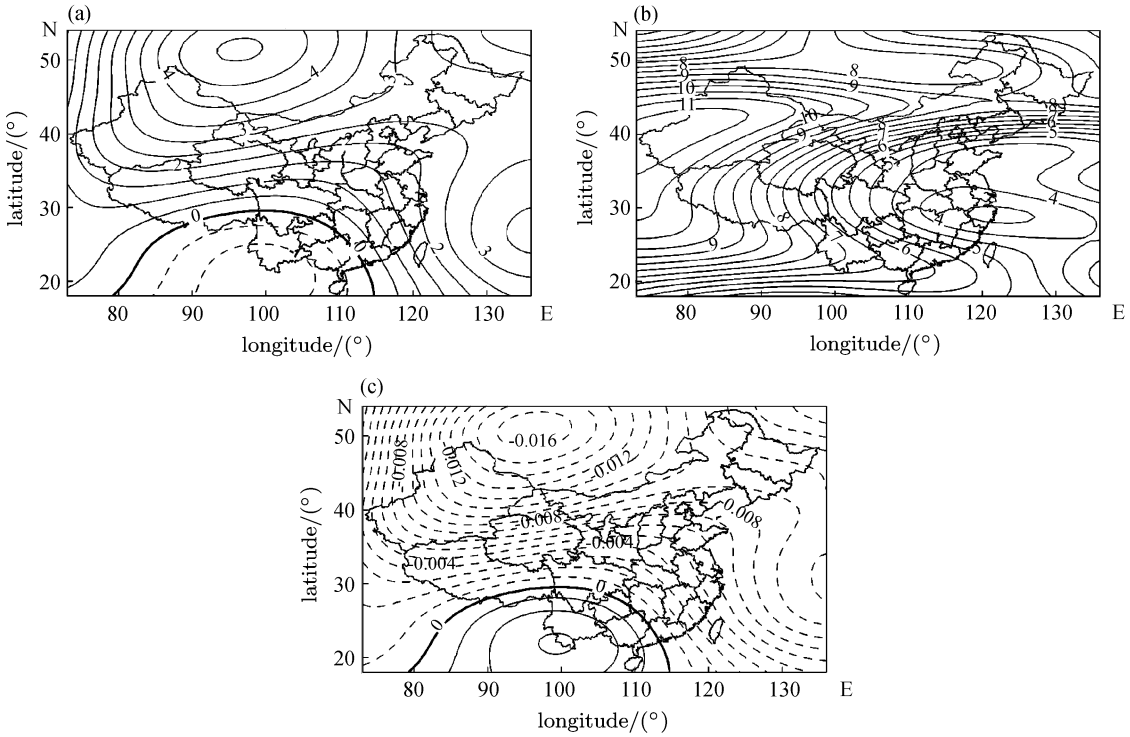


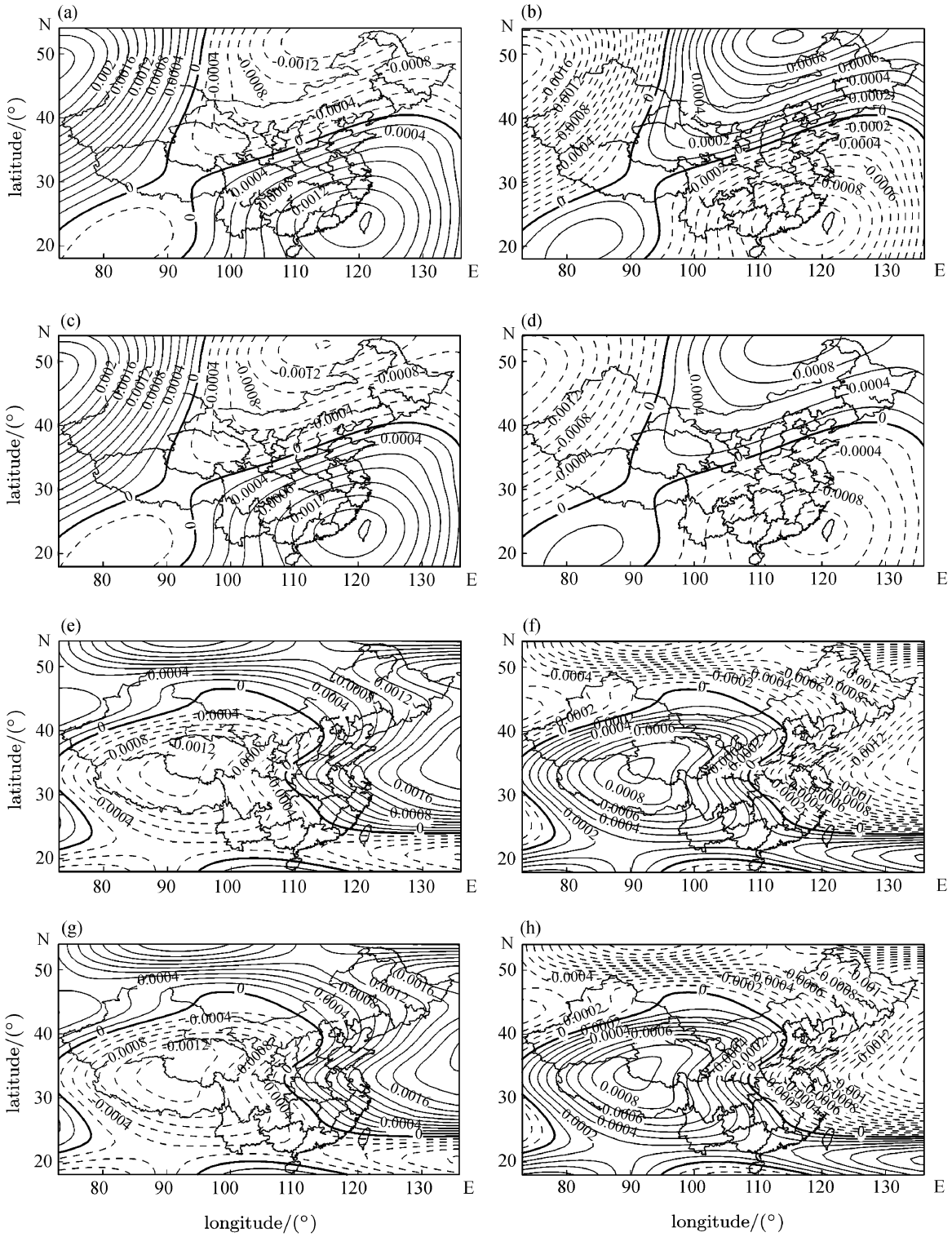
图 3　1960 年中国大陆地区 X(a), Y(b), Z(c) 分量的环形场分布 (单位 nT)

Fig. 3　Distribution charts of toroidal field component X (a), Y (b), Z (c) over Chinese mainland in 1960 (unit nT)

基本为正值, 强度随纬度增加, 变幅较小, 从 0 nT 变为 −0.15 nT 左右, 在云南南部有一正极值.

由于随时间变化的差异在图上不明显, 仍然采用分析外源场变化的方法分析 1960−2000 年期间环形场三分量在中国大陆地区随时间变化的情况, 结果如图 4 所示.

由图 4 可见, 1960−2000 年期间, 中国大陆地区 X, Y, Z 分量的环形场随时间的变化强度很小, 且各分量的强度变化分布几乎一样, 只是正负分布不同, 因此可认为该场在这 40 年内基本呈现周期性变



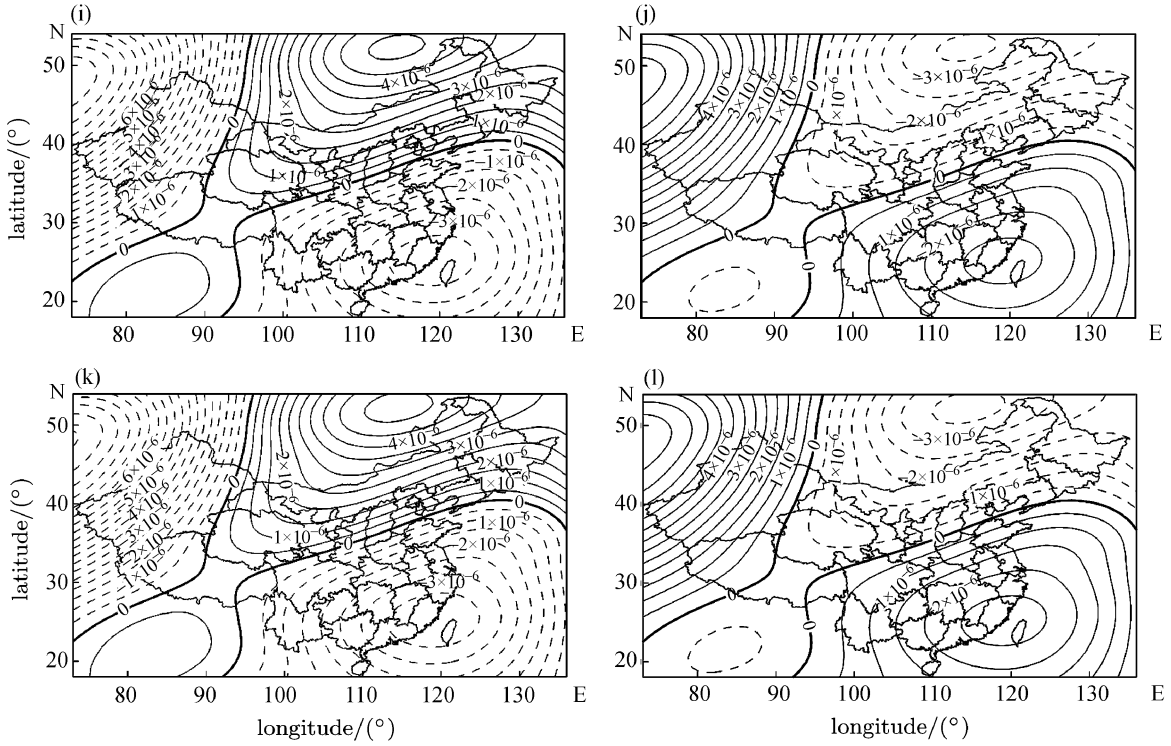


图 4　1960−2000 年中国大陆地区 X (a∼d), Y (e∼h) (单位 nT), Z (i∼l) 分量环形场差异

Fig. 4　Difference charts of toroidal field component X (a∼d), Y (e∼h) (unit nT), Z (i∼l) over Chinese mainland during 1960−2000

化.　X 分量在 1960−1970 年, 西部和东南部地区为正值, 中部地区为负值, 强度变化随经度增加先减少后增加 (见图 4a), 1970−1980, 1980−1990, 1990−2000 的正负值分布依次互换 (见图 4b∼d). Y 分量在 1960−1970 年期间大部分地区为负值, 在青海、西藏交界处有一正极值, 其强度变化随经度增加先减少后增加 (见图 4e), 以后各年代的正负值分布依次互换 (见图 4f∼h). Z 分量的分布与 X 分量较为类似, 只是强度变化小很多, 在中部地区为正值, 向西向东均为负值, 随经度增加先增加后减少 (见图 4i), 以后各年代的正负值分布依次互换 (见图 4j∼l).

2.3　磁层感应场

1960 年 X, Y, Z 分量在中国大陆地区的磁层感应场分布如图 5 所示.

由图 5 可见, X 分量在中国大陆地区的磁层感应场强度约正负各半, 强度随经度增加, 从 −0.8 nT 变为 0.5 nT 左右; Y 分量在中国地区均为负值, 强度随经度增加, 从 −1.1 nT 变为 −1.4 nT 左右; Z 分量在中国大陆地区的西部为正, 东部为负, 强度随经度增加, 从 1 nT 变为 −2 nT 左右.

通过同样的方法分析 1960−2000 年期间磁层感应场三分量在中国大陆地区随时间变化的情况, 结果如图 6 所示.

经比较发现, 磁层场的强度变化大于电离层感应场和环形场. 由图 6 可见, X 分量在 40 年间呈现先增大, 然后逐年减小的趋势. 1960−1970 年, 强度变化随纬度增加, 从 1.1 nT 变为 0.9 nT 左右, 平均增加了约 1 nT (见图 6a); 1970−1980, 1980−1990 以及 1990−2000 年的强度变化随纬度增加, 从 −5.5 nT 变为 −4.4 nT 左右, −3.4 nT 变为 −2.7 nT 左右, −0.19 nT 变为 −0.16 nT 左右, 分别平均减少了约 5 nT, 3.1 nT 和 0.18 nT (见图 6b∼d). 总体而言, X 分量共减少了约 7.3 nT. Y 分量的强度变化在中国大陆地区呈现先减小后增加的趋势, 1960−1970 年中国大陆地区基本为负值, 强度变化随经度增加, 从 −0.25 nT 变为 0.03 nT 左右, 平均减少了约 −0.1 nT (见图 6e); 1970−1980, 1980−1990 年的强度变化均随纬度增加, 从 1.2 nT 变为 −0.1 nT 左右, 0.7 nT 变为 −0.1 nT 左右, 分别平均增加了约 0.6 nT 和 0.3 nT; 1990−2000 年的变化趋势与

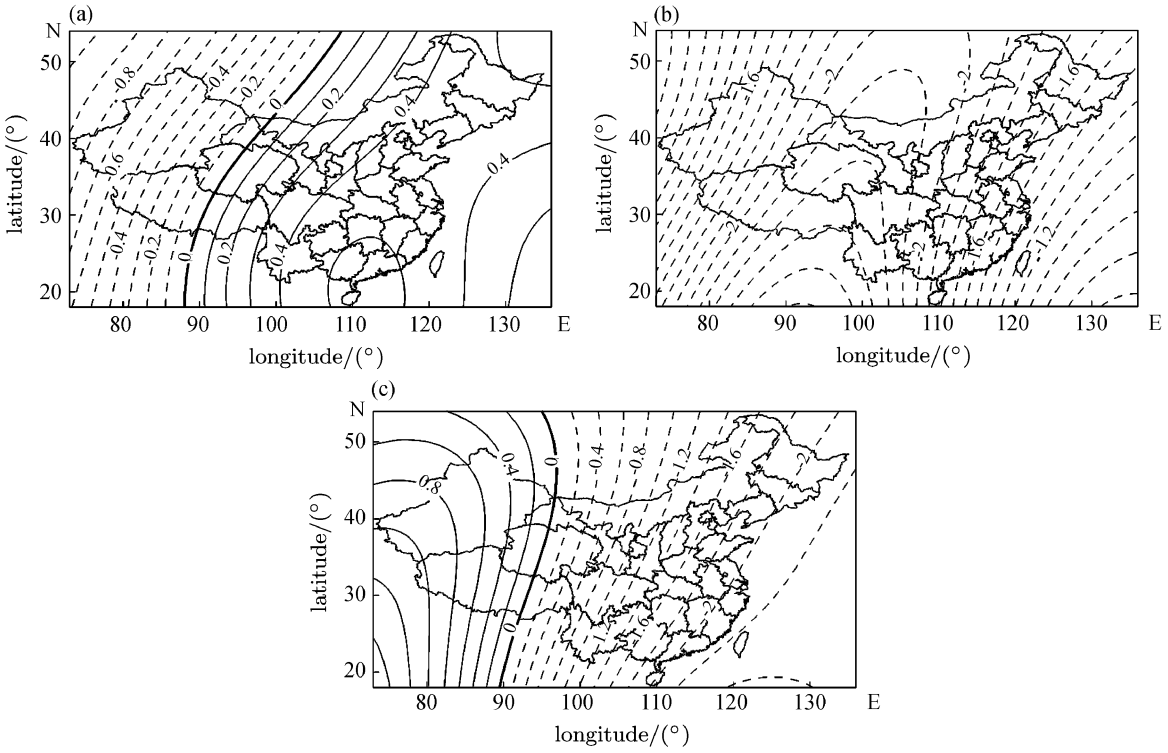
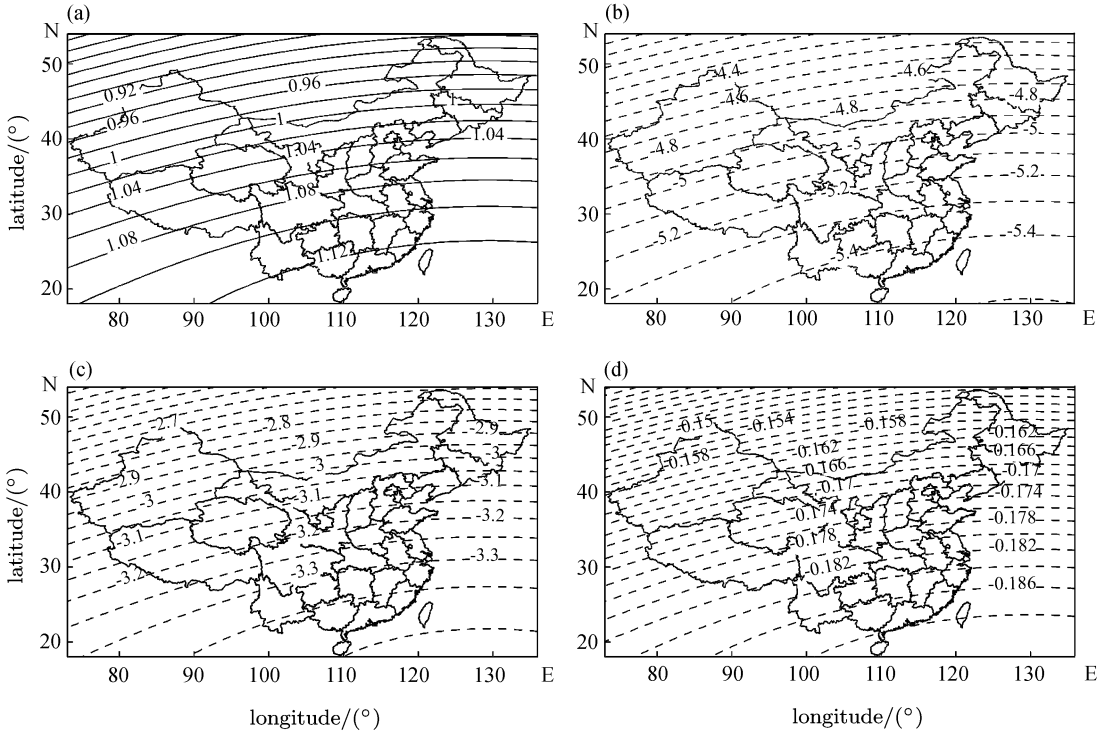


图 5 1960 年中国大陆地区 X (a), Y (b), Z (c) 分量磁层感应场分布 (单位 nT)

Fig. 5 Distribution charts of magnetospheric induced field component X (a), Y (b), Z (c) over Chinese mainland in 1960 (unit nT)



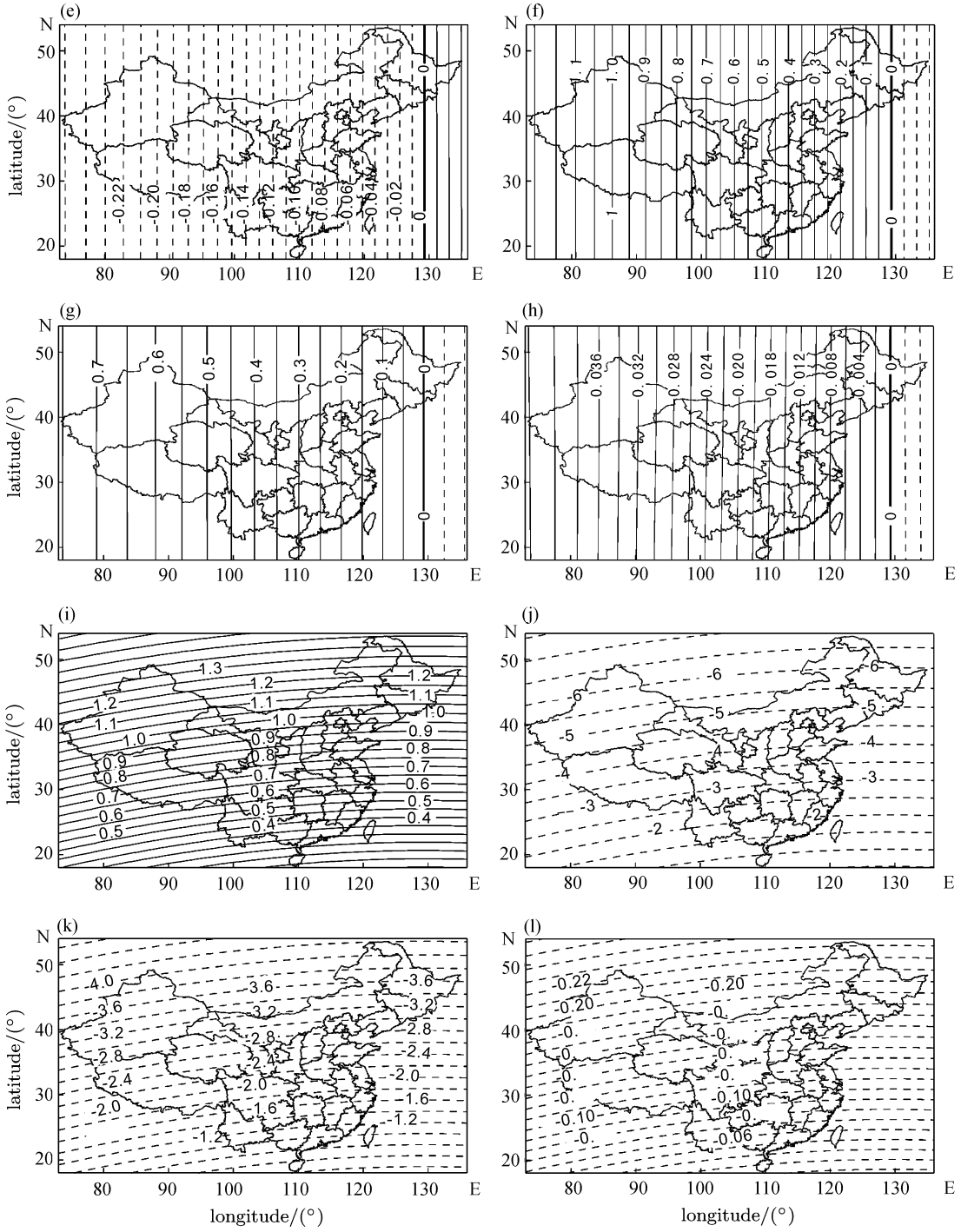


图 6　1960－2000 年中国大陆地区 X (a∼d), Y (e∼h), Z (i∼l) 分量磁层感应场差异 (单位 nT)

Fig. 6　Difference charts of magnetospheric induced field component X (a∼d), Y (e∼h), Z (i∼l) over Chinese mainland during 1960－2000 (unit nT)

1980－1990 年类似, 而变幅要小得多, (见图 6f∼h). 总体而言, Y 分量共增加了约 0.8 nT. Z 分量的强度变化总体呈现先增加后减少的趋势, 且均随纬度变化, 1960－1970 年均为正值, 强度随纬度增加, 从 0.2 nT 变为 1.3 nT 左右, 平均增加约 0.8 nT (见图 6i); 1970－1980, 1980－1990 和 1990－2000 年的强

度变化均随纬度增加, 从 −1 nT 变为 −6.5 nT 左右, −0.8 nT 变为 −4 nT 左右, −0.04 nT 变为 −0.22 nT 左右, 分别平均减少了约 3.8 nT, 2.4 nT 和 0.1 nT (见图 6j~l). 总体而言, Z 分量在 1960−2000 年共减少了约 5.5 nT.

2.4 弱磁场变化分析

由图 2、图 4 和图 6 可见, 外源弱磁场各研究周期的差异很小. 对于环形场, 三分量随时间的强度变化甚至小于 0.01 nT. 为了进一步观察其变化, 分别计算 1990, 1991, 2000 等 11 年的三个弱磁场, 并将后一年代值减去前一年代值, 分析年变化情况. 三分量的弱磁场年变化如图 7~9 所示.

由图 7~9 可见, X, Y, Z 分量的电离层感应场、环形场以及磁场感应场在年际间的变化较小. 磁层场由于受到太阳高能粒子冲击等作用, 会产生较大尺度的变化, 进而使磁场感应场产生相对较大的年变化, 在 1990−2000 年的 X 和 Y 分量的变幅约为 −5~5 nT. 电离层磁场除 Z 分量在 1990−1993 年变化大于 1 nT 外, 其余时间段的强度变化均小于 1 nT. 环形场强度的变化更小, 三分量在 1992−2000 年间几乎不发生变化, Z 分量的年变化甚至小于 0.01 nT.

为进一步分析 1900−2000 年间各分量的电离层感应场、环形场以及磁层感应场的总体变化值, 将 1900−2000 的年变化值累计求和, 结果列于表 1.

表 1 1990−2000 年 X, Y, Z 分量电离层感应场、环形场及磁层感应场的强度变化 (单位 nT)

Table 1 Intensity variation table of magnetospheric induced field, ionospheric induced field and toroidal field component X, Y, Z during 1990−2000 (unit nT)

	X	Y	Z
电离层感应场	−0.445	−1.343	−0.915
环形场	−0.768	−0.147	0.002
磁层感应场	2.752	−0.217	2.886

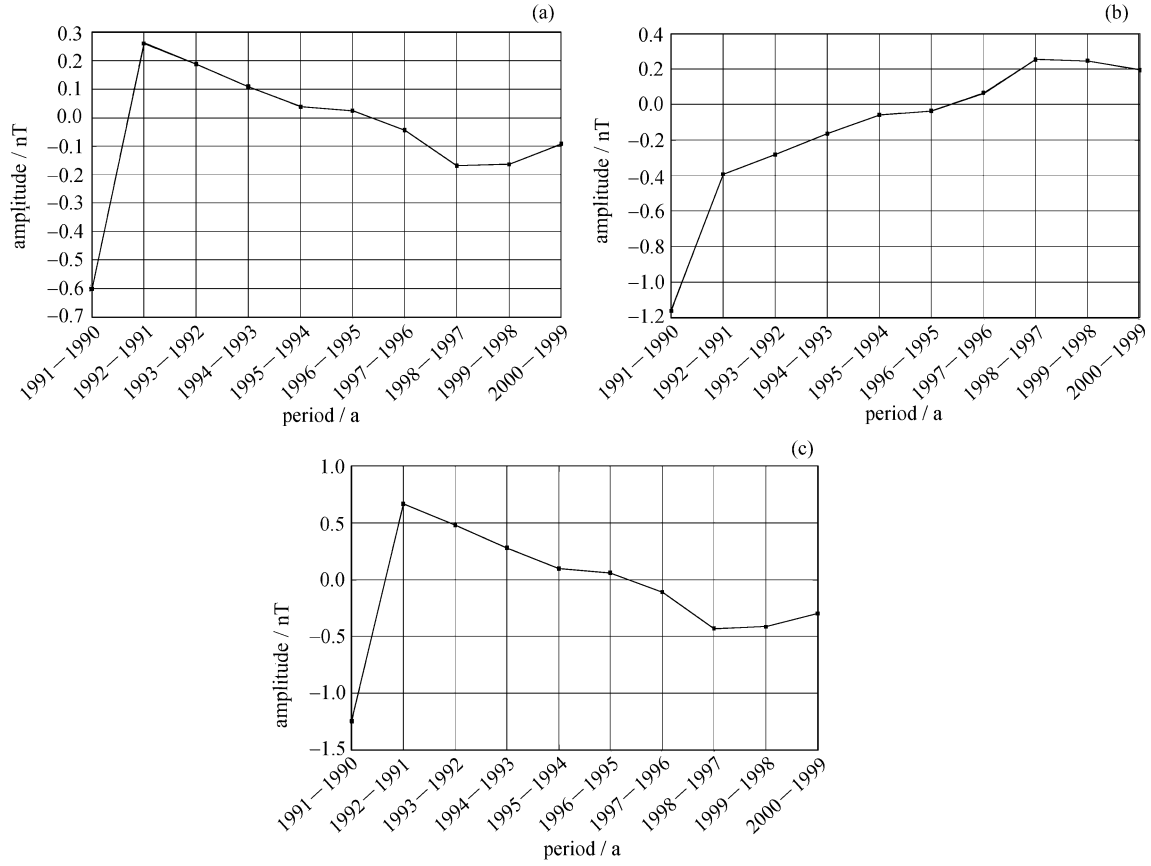


图 7 1990−2000 年 X (a), Y (b), Z (c) 分量电离层感应场的年变化

Fig. 7 Annual variation charts of ionospheric induced field of component X (a), Y (b), Z (c) during 1990−2000

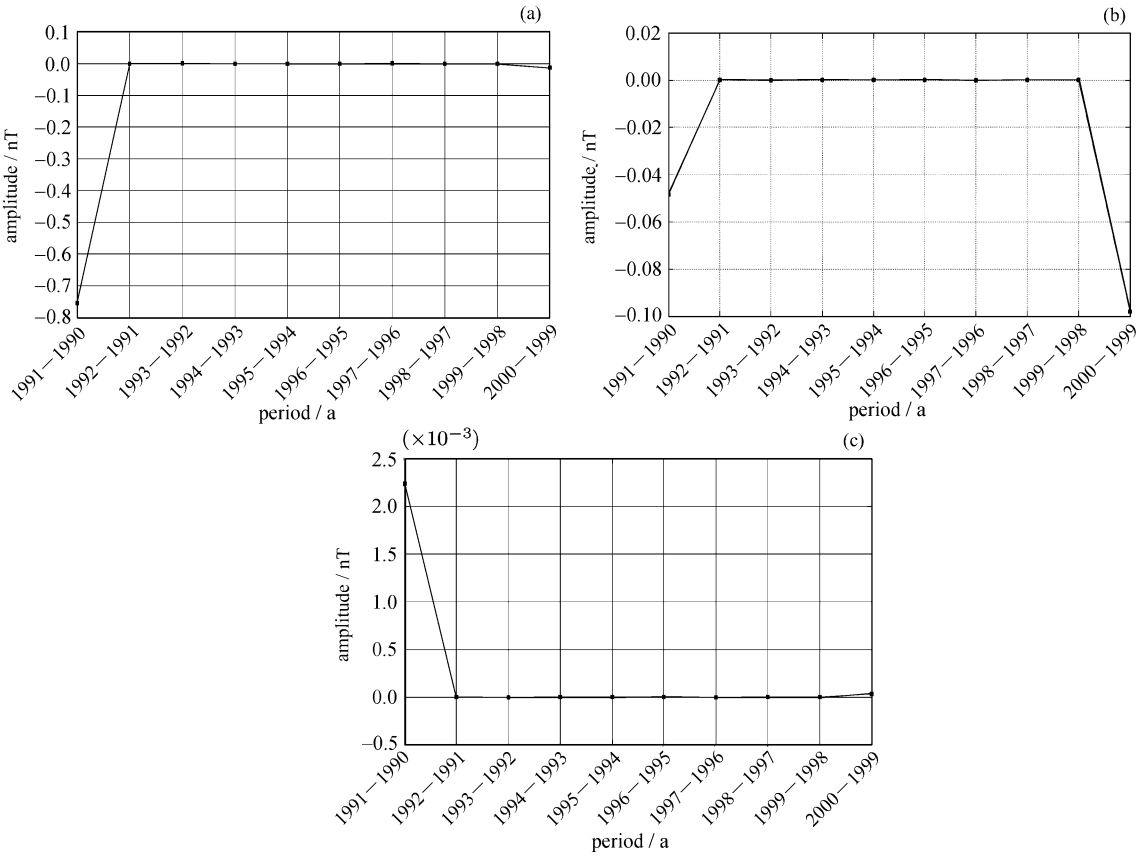


图 8　1990—2000 年 X (a), Y (b), Z (c) 分量环形场的逐年变化

Fig. 8　Annual variation charts of toroidal field of component X (a), Y (b), Z (c) during 1990—2000

由表 1 可更明显看出, 在 1990—2000 年期间, 电离层感应场的总体变化较小, 除了 Y 分量外, 均小于 1 nT; 环形场的三分量变化更小, 变化值均小于 1 nT, 其中 Y 和 Z 分量甚至小于 0.5 nT, 磁场感应场的变化幅度相对较大, 其 X 和 Z 分量的总体变化约为 2.8 nT.

由图 7~9 和表 1 可知, X, Y, Z 分量的三个外源弱磁场年变化很小, 由于太阳 11 年活动周期的影响, 故图 2、图 4 和图 6 的等值线数值很小.

3　结论

通过对 1960—2000 年中国大陆地区电离层感应场、环形场及磁层感应场的时空变化, 结合 CM4 模型所进行的相关分析, 可以得出如下结论.

(1) 对于电离层感应场与环形场, 其三分量随时间的变化强度较小. 通过分析其随时间的强度变化, 发现 1960—1970 和 1970—1980, 1980—1990 和 1990—2000 年的变化呈正负互换的现象. 因此可认为该场在 1960—2000 年内呈现周期性变化. 由于电离层感应场和环形场均产生于电离层, 故认为上述现象可能与太阳 11 年活动周期变化对电离层的影响有关, 该现象有待通过更长时间的实测数据验证.

(2) 对于磁层感应场, X 分量呈现先增大后逐年减小的趋势, 共减少了约 7.3 nT, Y 分量呈先减少, 后逐年增加的趋势, 共增加了约 0.8 nT, Z 分量变化随时间呈先增加后减小的趋势, 共减小了约 5.5 nT.

(3) 经过 1990—2000 年的年变化比较分析, 认为三种弱磁场每年存在一定强度的变化, 其中磁场感应场变化最大, 电离层感应场次之, 环形场最小. 由于年变化的正负抵消以及可能存在的太阳 11 年活动的影响, 导致了 4 个周期的强度变化较小.

由于地磁感应场取决于地球内部电导率, 而卫星数据处理中用到的地球电导率模型一般精度有限, 因

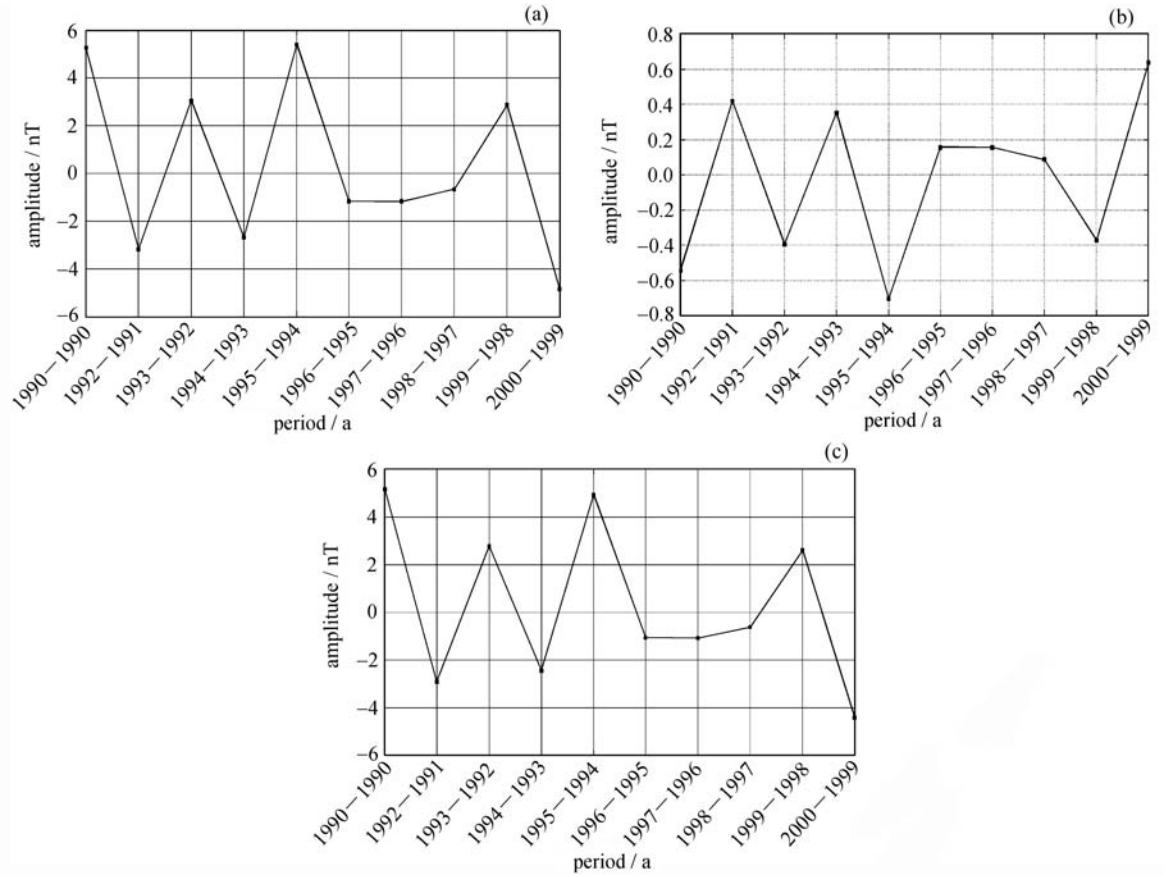


图 9 1990—2000 年 X (a), Y (b), Z (c) 分量磁层感应场的逐年变化

Fig. 9 Annual variation charts of magnetospheric induced field of component X (a), Y (b), Z (c) during 1990—2000

此, 本文所得到的结果只代表了基于 CM4 模型的模拟结果, 其精度有待更高质量的卫星数据以及更高精度的模型验证.

2012 年欧空局将要发射 Swarm 星座, 其将提供更高精度的地磁测量数据, 结合海洋、航空以及地面站点的长期观测数据, 可建立起精度更高的三维地磁模型, 从而估算出更为准确的数值, 甚至磁扰期间的外源磁场的变化, 这将为空间科学、地球物理、气象等领域的研究和应用提供参考.

致谢 丹麦空间研究所 Olsen N 教授对本文提供了很大帮助.

参考文献

[1] Hulot G, Sabaka T J, Olsen N. The present field//Treatise on Geophysics[M]. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2007, Vol(5) . 3-75

[2] Olsen N, Sabaka T J, Lowes F. New parameterization of external and induced fields in geomagnetic field modeling and a candidate model for IGRF 2005 [J]. *Earth Planets Space*, 2005, **57**:1141-1149

[3] Moretto T, Ennerstrøm S V, Olsen N, *et al*. Using global magnetospheric models for simulation and interpretation of Swarm external field measurements [J]. *Earth Planets Space*, 2006, **58**:439-449

[4] Maus S, Luhr H, Purucker M. Simulation of the high-degree lithospheric field recovery for the Swarm constellation of satellites [J]. *Earth Planets Space*, 2006, **58**:397-407

[5] Olsen N. Magnetospheric contributions to geomagnetic daily variations [J]. *Ann. Geophys.*, 1996, **14**:538-544

[6] Ritter P, Luhr H, Maus S, *et al*. High-latitude ionospheric currents during very quiet times: their characteristics and predictability [J]. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**:2001-2014

[7] Engels U, Olsen N. Computation of magnetic fields within source regions of ionospheric and magnetospheric currents [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1998, **60**:1585-1592

[8] Olsen N, Glassmeier K H, Jia X. Separation of the magnetic field into external and internal field [J]. *Space Sci. Rev.*, 2010. doi:10.1007/s11214-009-9563-0

[9] Bai Chunhua, Xu Wenyao, Kang Guofa. Main geomagnetic field models [J]. *Prog. Geophys.*, 2008, **23**(4):1045-1057. In Chinese (白春华, 徐文耀, 康国发. 地球主磁场模型 [J]. 地球物理学进展, 2008, **23**(4):1045-1057)

[10] Sabaka T J, Baldwin R T. Modeling the S_q magnetic field from POGO and Magsat satellite and contemporaneous hourly observatory data: phase I [R]. NASA/GSFC Cont ractNAS5. 1993, 31760

[11] Langel R A, Sabaka T J, Baldwin R T, *et al.* The near Earth magnetic field from magnetospheric and quiet-day ionospheric sources and how it is modeled [J]. *Phys. Earth Planet Int.*, 1996, **98**(324):235-267

[12] Sabaka T J, Olsen N, Langel R A. A comprehensive model of the quiet-time, near-Earth magnetic field: phase 3 [J]. *Geophys. J. Int.*, 2002, **151**:32-68

[13] Sabaka T J, Olsen N, Purucker M E. Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field with Ørsted and CHAMP data [J]. *Geophys. J. Int.*, 2004, **159**:521-547

[14] Maus S, Weidelt P. Separating the magnetospheric disturbance magnetic field into external and transient internal contributions using a 1D conductivity model of the Earth [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31. doi:10.1029/2004GL020232

[15] Tsyganenko N A. Space Science Reviews [M]. Belgium Printed: Kluwer Academic Publishers. 1990, **54**:75-186

[16] Olsen N. A new tool for determining ionospheric currents from magnetic satellite data [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**(24):3635-3638

[17] Olsen N. Ionospheric F region currents at middle and low latitudes estimated from Magsat data [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A3):4563-4576

[18] Luhr H, Maus S. Direct observation of the F region dynamo currents and the spatial structure of the EEJ by CHAMP [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L24102, doi: 10.1029/2006GL028374

[19] Zhang Manlian, Shang Duping, Guo Jianshan, *et al.* The global ionospheric response to the geomagnetic storm event during May 1998 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2001, **21**(2):131-140. In Chinese (张满莲, 尚杜平, 郭建善, 等. 1998 年 5 月磁暴事件期间全球电离层相应形态与机制的研究 [J]. 空间科学学报, 2001, **21**(2):131-140)

[20] Ding Jianhai, Suo Yucheng, Yu Surong. Phenomena of geomagnetic and ionospheric anomalies and their relation to earthquakes [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(6):536-542. In Chinese (丁鉴海, 索玉成, 余素荣. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(6):536-542)

[21] Zhang Manlian, Radicella S M. Global ionospheric response to the geomagnetic storm event of April 6—7, 2000 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(3):173-180. In Chinese (张满莲, Radicella S M. 全球电离层对 2000 年 4 月 6—7 日磁暴事件的响应 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(3):173-180)

[22] Zhan Liang, Liu Libo, Wan Weixing, *et al.* Morphology of ionospheric disturbances over Kokubunji during geomagnetic disturbances [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(5):391-399. In Chinese (占亮, 刘立波, 万卫星, 等. 地磁扰动期间日本 Kokubunji 站电离层的扰动特征分析 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(5):391-399)

[23] Ding Zonghua, Sun Shuji, Chen Chun, *et al.* Variations of ionospheric parameters during the total solar eclipse on 22 July 2009 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(2):187-193. In Chinese (丁宗华, 孙树计, 陈春, 等. 2009 年 7 月 22 日日全食期间电离层参量的变化 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(2):187-193)

[24] Zhang Lingqian, Liu Zhenxing, Wang Jiye, *et al.* Effect of tailward flows from the ionosphere on the near-Earth magnetic field [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(3):192-197. In Chinese (张灵倩, 刘振兴, 王继业, 等. 来自电离层的尾向流对近地磁场位形的影响 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(3):192-197)

[25] Hu Hongqiao, Liu Ruiyuan, Yang Huigen, *et al.* Dependences of postnoon auroral intensity on solar wind-magnetosphere coupling functions [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, **26**(4):241-249. In Chinese (胡红桥, 刘瑞源, 杨慧根, 等. 午后极光强度与太阳风磁层耦合函数的相关 [J]. 空间科学学报, 2006, **26**(4):241-249)

[26] Yao Li, Liu Zhenxing, Zuo Pingbing, *et al.* Compression effects of interplanetary shock to the magnetosphere [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(2):113-120. In Chinese (姚丽、刘振兴、左平兵, 等. 行星际激波对地球磁层的压缩效应分析 [J]. 空间科学学报, 2010, **30**(2):113-120)

[27] Xu Wenyao. Energy budget in the coupling processes of the solar wind, magnetosphere and ionosphere [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(1):1-14. In Chinese (徐文耀. 太阳风–磁层–电离层耦合过程中的能量收支 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(1):1-14)

[28] Olsen N. The solar cycle variability of lunar and solar daily geomagnetic variations [J]. *Ann. Geophys.*, 1993, **11**:254-262