

东亚地区地磁非偶极场长期变化的分析

林云芳 曾小萍 郭启华
(国家地震局地球物理研究所)

摘要

本文利用东亚及其邻近地区 50 个地磁台站 1955—1977 年地磁三要素 (D 、 H 、 Z) 的实测年平均值算出的非偶极场值 X 、 Y 、 Z , 选用“按距离加权最小二乘曲面拟合”方法, 计算、绘制、分析了东亚地区地磁非偶极场及其长期变化的时空分布特征, 并与国际参考场 (IGRF) 模式进行了粗略的对比。所得的主要结果是: 1. 1955.0—1965.0 年代, 东亚地区 Z 分量的增长速度在迅速减小; 1965.0 年代以后, Z 值在逐年下降。2. 从整体上看, 东亚地区地磁非偶极场虽然形态与 IGRF 给出的结果基本吻合, 但长期变化有明显差异。1965.0 年代的 IGRF 长期变化模式与实测结果偏差甚大。为了使 IGRF 模式更好地拟合地磁长期变化处于转折时期的复杂地区的情况, 看来时间间隔应更短些, 例如 5 年为好, 采用现在通用的方法是不适宜的。

一、引言

许多研究者常常用地磁非偶极场(即从基本磁场中消去中心偶极子场)来描述地磁异常的特征。T. Yukutake^[1,2] 利用不同年代的地磁场球谐系数对十七世纪以来 400 年左右的地磁非偶极场进行了分析研究, 认为全球地磁非偶极场存在九大异常, 东亚磁异常(因其中心位于蒙古, 又称蒙古异常)是其中最大的异常。对每个磁异常进行考察后, T. Yukutake 将这九大异常分为三类: 一类是有西向漂移的异常, 如非洲负异常, 从 1770 年以来, 每年大约以 0.28° 的速度向西漂移; 第二类异常是其位置不动, 但有强度的变化, 最具代表性的就是东亚磁异常, T. Yukutake 指出, 东亚磁异常是 400 年以前逐渐出现的, 在最近 400 年内, 其 Z 分量的平均增长速度为 $53 \text{ nT}/\text{年}$; 第三类是其空间位置和磁场强度几乎都不变化的异常, 北美异常即属此类。

我国地处东亚磁异常中心的南部、东部和西南部。整个亚洲, 甚至部分欧洲地区的地磁场均受此异常的控制。因此, 分析研究此异常的时空变化规律, 除了对进一步探讨其场源, 追溯地球内部物质运动状态有意义外, 对于了解我国地磁场长期变化的时空变化规律, 也是十分必要的。

本文选用了“按距离加权最小二乘曲面拟合”方法对该地区及其邻近地区的地磁非偶极场值 (X 、 Y 、 Z) 进行拟合, 分析了东亚地区 22 年地磁非偶极场的时空变化特征。并粗略对比了 1965.0 和 1975.0 年代的 IGRF 模式^[3,4]在东亚磁异常地区的拟合情况。

二、资料及处理方法

本文所用的原始数据为东亚及其邻近地区 50 个地磁台站的磁偏角 D 、水平分量 H 和垂直分量 Z 的年均值^[5,6]。各台站的位置分布见图 1 中“▲”，其地理位置和本文使用各台资料的时间段列于表 1。

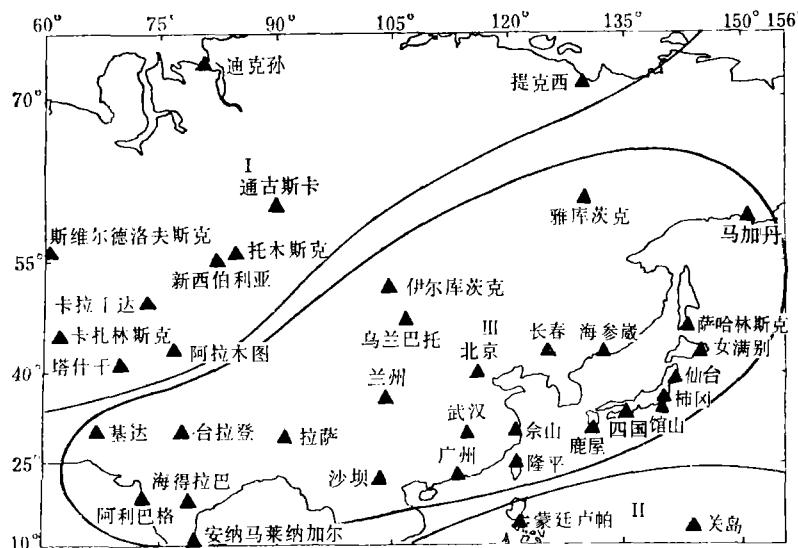


图 1

从表 1 看出，台站分布在球面较大的区域内，所以描述该区域范围内的地磁场分布，就不能把球面问题按平面处理，必须考虑投影变换。另外，各个台站的资料质量各有差别，且它们的观测值与其所在地区地磁正常场值的差异也难以估计。故本文选用了“按距离加权最小二乘曲面拟合”法^[7]来描绘东亚地区地磁场的分布。现将本方法简述如下。

设 f 代表地磁非偶极场 X 、 Y 、 Z 或其年变率 \dot{X} 、 \dot{Y} 、 \dot{Z} ， f 为地面各点位置 (λ, ϕ) 的函数，即

$$f = f(\lambda, \phi)$$

表 1 地磁台站的地理位置及使用资料的时间段

编号	台 站	地理经度 $\lambda(E)$	地理纬度 $\phi(N)$	等效纬度 $\sigma(N)$	使用资料 时间段
1	海斯岛 (Heiss Island)*	58° 03'	80° 37'	143° 15'	1960—1977年
2	切留斯金 (Chelyuskin)*	104° 17'	77° 43'	127° 44'	1955—1977
3	迪克孙 (Dikson)	80° 34'	73° 33'	110° 49'	1955—1977
4	提克西 (Tixy)	129° 00'	71° 35'	104° 15'	1955—1977
5	雅库茨克 (Yakutsk)	129° 43'	62° 01'	79° 37'	1955—1977
6	通古斯卡 (Pod.-Tungusk)	90° 00'	61° 36'	78° 44'	1970—1975
7	马加丹 (Magadan)	151° 01'	60° 07'	75° 41'	1967—1977
8	列宁格勒 (Leningrad)*	30° 42'	59° 57'	75° 21'	1955—1977
9	斯维尔德洛夫斯克 (Sverdlovsk)	61° 04'	56° 44'	69° 13'	1955—1977

表 1 (续)

编号	台 站	地理经度	地理纬度	等效纬度	使用资料 时间段
		$\lambda(E)$	$\phi(N)$	$\sigma(N)$	
10	托木斯克 (Tomsk)	84° 56'	56° 28'	68° 44'	1959—1969年
11	喀山 (Kazan)*	48 51	55 50	67 36	1955—1972
12	莫斯科 (Moscow)*	37 19	55 28	66 39	1955—1977
13	新西伯利亚 (Klyuchi)	82 54	55 02	66 11	1968—1977
14	彼得罗巴甫洛夫斯克 (Petropavlovsk)*	158 38	53 06	62 54	1970—1977
15	伊尔库茨克 (Irkutsk)	104 27	52 10	61 21	1955—1977
16	基辅 (Kiev)*	30 18	50 43	59 02	1959—1977
17	卡拉干达 (Karaganda)	73 05	49 49	57 37	1966—1977
18	乌兰巴托 (Ulan Bator)	107 03	47 51	54 38	1967—1977
19	萨哈林斯克 (Sakhalinsk)	142 43	46 57	53 18	1955—1977
20	敖德萨 (Odessa)*	30 53	46 47	53 04	1955—1977
21	卡扎林斯克 (Nova-Kazalinsk)	62 07	45 46	51 35	1975—1977
22	女满别 (Memambetsu)	144 12	43 54	48 58	1955—1977
23	长春 (Changchun)	125 18	43 50	48 52	1958—1977
24	海参崴 (Vladivostok)	132 10	43 41	48 39	1955—1977
25	阿拉木图 (Alma Ata)	76 55	43 15	48 04	1964—1977
26	第比利斯 (Tbilisi)*	44 42	42 05	46 28	1955—1977
27	塔什干 (Tashkent)	69 37	41 20	45 28	1955—1977
28	坎迪利 (Kandilli)*	29 04	41 04	45 07	1955—1977
29	北京 (Beijing)	116 10	40 02	43 45	1959—1977
30	仙台 (Mizusawa)	141 12	39 06	42 33	1970—1977
31	阿什哈巴德 (Ashkhabad)*	58 06	37 57	41 04	1960—1977
32	柿冈 (Kakioka)	140 11	36 14	38 55	1955—1977
33	兰州 (Lanzhou)	103 51	36 05	38 44	1960—1977
34	馆山 (Kanozan)	139 58	35 15	37 43	1962—1977
35	四国 (Simosato)	135 56	33 34	35 41	1955—1977
36	鹿屋 (Kanoya)	130 53	31 25	33 07	1959—1977
37	余山 (Zo-Se)	121 11	31 06	32 45	1955—1977
38	武昌 (Wuchang)	114 34	30 32	32 05	1964—1977
39	台拉登 (Dehra Dun)	77 48	30 22	31 54	1965—1977
40	基达 (Quetta)	66 57	30 11	31 41	1955—1975
41	拉萨 (Lhasa)	91 02	29 38	31 03	1958—1974
42	隆平 (Lunping)	121 10	25 00	25 50	1966—1977
43	广州 (Guangzhou)	113 21	23 05	23 44	1961—1977
44	沙坝 (Cha Pa)	103 50	22 21	22 56	1956—1975
45	檀香山 (Honolulu)*	202 00	21 19	21 50	1955—1977
46	阿利巴格 (Alibag)	72 52	18 38	18 58	1955—1977
47	海得拉巴 (Hyderabad)	78 33	17 25	17 41	1966—1977
48	蒙廷卢帕 (Muntinlupa)	121 01	14 22	14 31	1955—1977
49	关岛 (Guam I.)	144 52	13 35	13 43	1958—1977
50	安纳马莱纳加尔 (Annamalai Nagar)	79 41	11 24	11 29	1959—1977

- 注: 1. 表中等效纬度 σ 为用 Mercator 投影变换(见下文(1)式), 将球面地理纬度 φ 换算为柱面纬度的值。
 2. 武昌台资料仅用于计算长期变化。
 3. 表中标有“*”号的台站未绘入图 1.

为了便于数学处理及作图方便,本文采用了柱面投影,把函数 $f(\lambda, \phi)$ 变换为 $f(\lambda, \sigma)$. σ 为等效纬度,是地理纬度 ϕ 的柱面投影值。由 Mercator 投影变换^[8],将柱面上的点 (λ, σ) 投影到 $x-y$ 平面上:

$$\left. \begin{array}{l} x = R\lambda, \\ y = -\sigma R = R \ln \operatorname{tg} \frac{1}{2} (90^\circ - \phi). \end{array} \right\} \quad (1)$$

其中 R 为地球平均半径,这样在球面上建立函数 $f(\lambda, \phi)$ 就变成了在 $x-y$ 平面上建立函数 $f(x, y)$ 的问题。

将 $x-y$ 平面上 $\lambda = 60^\circ-156^\circ\text{E}$, $\sigma = 10^\circ-112^\circ\text{N}$ (即 $\phi = 10^\circ-74^\circ\text{N}$) 这一空间范围内,按 $\Delta\lambda = 3^\circ$, $\Delta\sigma = 3^\circ$ 的间隔划分为 1155 个矩形网格点,在每个网格点上作一个二次曲面:

$$f(x, y) = c_1 + c_2x + c_3x^2 + c_4xy + c_5y + c_6y^2 \quad (2)$$

表示该网格点及其邻域内的非偶极场各分量或其年变率的分布。

选取(2)式中的系数 $c_k (k = 1, 2, \dots, 6)$, 使二次型

$$Q = \sum_{i=1}^N [f(x_i, y_i) - z_i]^2 w \{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2\} \quad (3)$$

达到极小。即

$$\frac{\partial Q}{\partial c_k} = 0.$$

此处 $f(x_i, y_i)$ 为在第 i 个观测点 (x_i, y_i) 的拟合值, z_i 为该观测点的观测值, w 是权函数。本方法要求 $x-y$ 平面上靠近任一点 (a, b) 的数据比远离该点的数据拥有更大的权重, 即要求 w 具有如下性质: 当观测点 (x_i, y_i) 接近点 (a, b) 时, w 值大, z_i 的权重就大; 反之亦然。为此, 选用了权函数 $w = \frac{e^{-ar^2}}{r^2}$ 的形式, 其中 $r^2 = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2$, 为任一网格点 (a, b) 与其邻近观测点 (x_i, y_i) 之间距离的平方, a 为 (a, b) 与所考虑的邻近观测点之间平均距离平方的倒数。考虑到计算精度和计算量, 取离点 (a, b) 最近的 10 个观测点进行加权计算, 即取(3)式中的 $N = 10$ 。

由 1155 个二次曲面片所作出的模型 $f(a, b)$ 来拟合东亚地区非偶极场某分量或其长期变化的分布(相邻两条等值线间隔为 1000nT, 等变线间隔为 5 nT/年), 我们得到此空间范围内 1960.0—1975.0 年代的等值图(图 2—图 4) 和 1955.0—1975.0 年代内每隔 5 年的等变线图(图 8—图 10)。

用本文的方法, 每个网格值均由离网格点最近的 10 个台站的观测值计算得来的, 其拟合值理应有一定的空间代表性, 但从上述图中不难看出, 仍有不光滑的曲线出现。这可能是由于参加计算的台站观测值偏离它们所在地区的地磁正常场值, 以及各台站的资料质量各有差异造成的。由于上述原因, 本文仅分析东亚地区非偶极场时空分布的整体性特征, 而不讨论区域性磁场细致差异, 所以非光滑部分将不影响本文的分析结果。

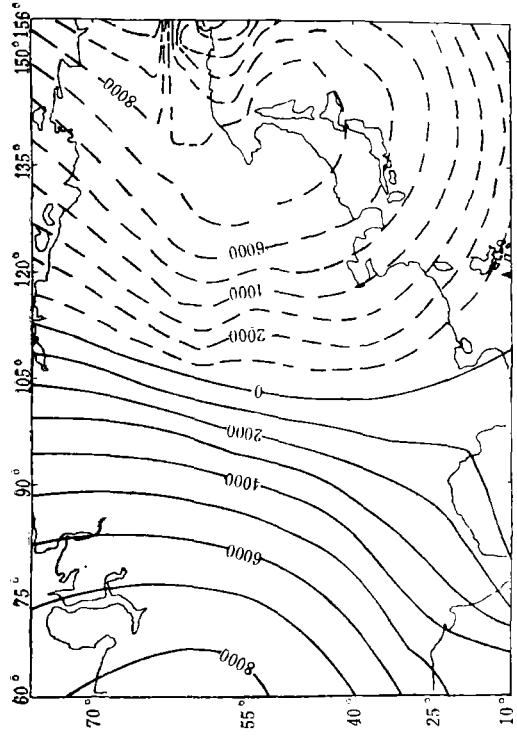


图 2 1965.0 年代非偶极场 X 分量等值图

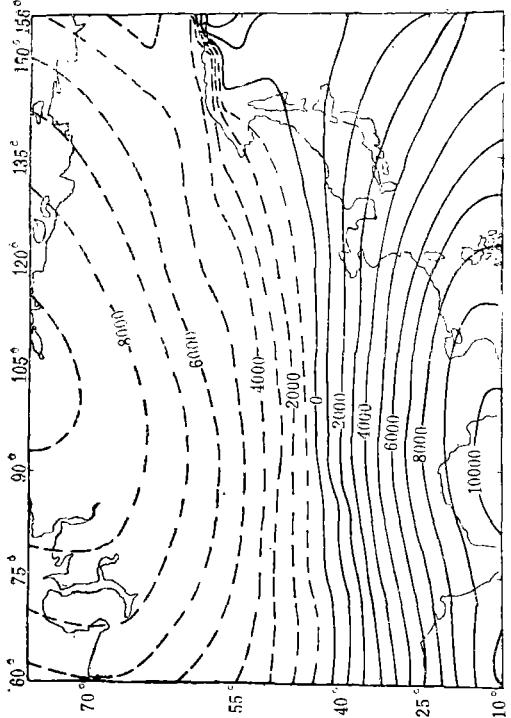


图 5 1965.0 年代非偶极场 X 分量等值图(由 IGRF 算出)

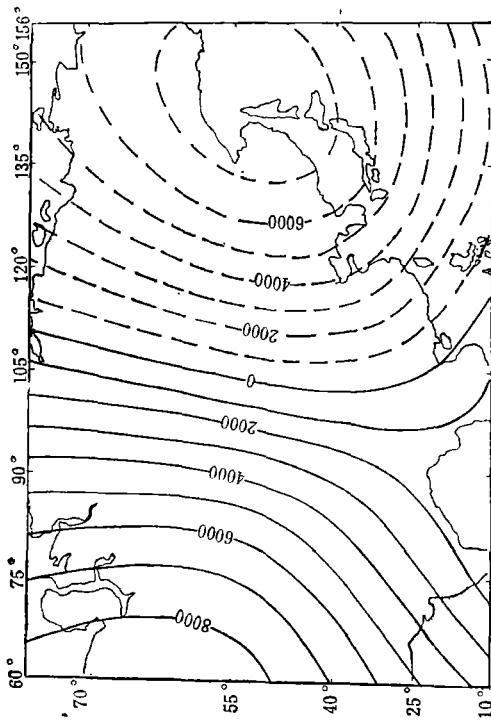


图 3 1965.0 年代非偶极场 Y 分量等值图

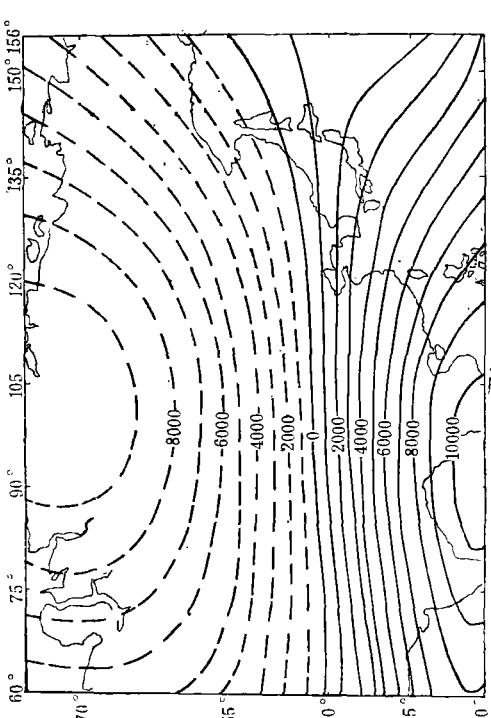
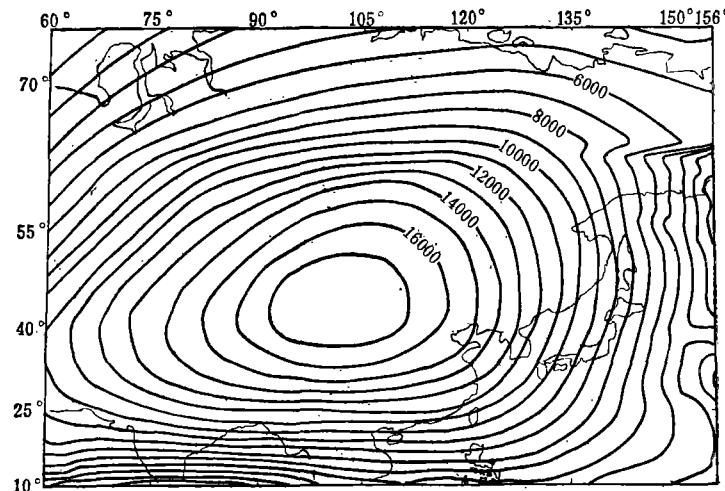
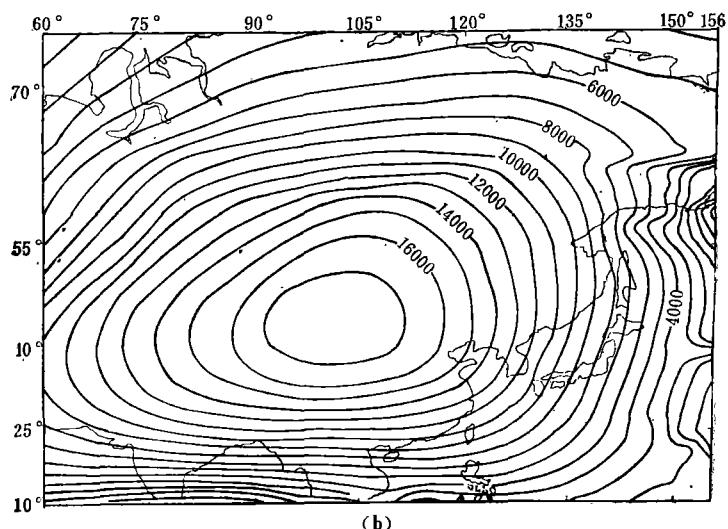


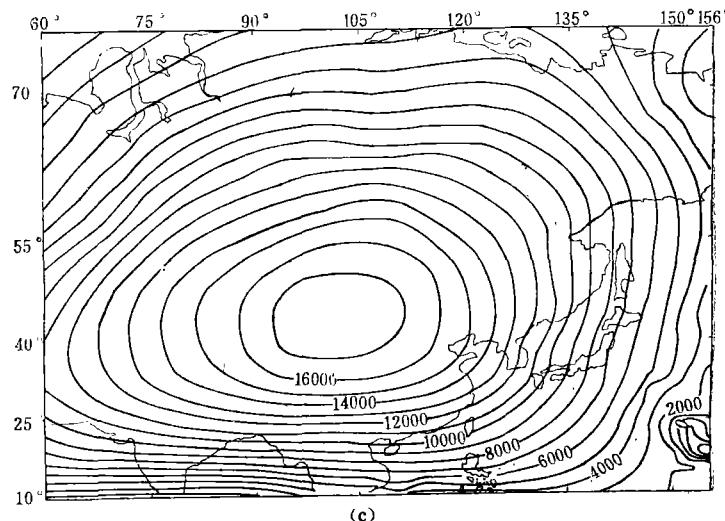
图 6 1965.0 年代非偶极场 Y 分量等值图(由 IGRF 算出)



(a)



(b)



(c)

图 4 各年代非偶极场 Z 分量等值图

(a) 1900.0 年代; (b) 1965.0 年代; (c) 1975.0 年代.

三、东亚地区非偶极场的时空分布特征

1. 非偶极场 X 、 Y 、 Z 的分布

从图 2 和图 3 可以看出, X 等值线近东西走向, Y 等值线以南北走向为主。比较各年代的等值线图表明, 在 1960—1975 年间 X 、 Y 在空间上几乎没有移动。

由图 4 明显地看出东亚地区 Z 等值线呈闭合状, 这就是所谓的东亚磁异常。 Z 强度最大的地区位于蒙古和中国的内蒙古、甘肃、新疆一带。由上述方法计算的各年代 Z 的最大值定出的异常中心位置(或称焦点位置)为: $\lambda = 101^\circ\text{E}$, $\phi = 44\text{--}45^\circ\text{N}$ 。这一中心位置在 1955—1977 年的 22 年中, 几乎没有移动。图 4(a) 和 (b) 中, 17000 nT 的等值线所围面积几乎不变, 说明在 1960—1965 年代期间, 东亚磁异常中心的强度值增长速度缓慢; 图 4(b) 和 (c) 中, 17000 nT 线所围面积略有缩小, 表明由 1965 至 1975 年代 Z 的强度在减小。

2. 非偶极场长期变化 \dot{X} 、 \dot{Y} 和 \dot{Z} 的分布

本文用每 5 年内的平均年变率来考察东亚地区非偶极场的长期变化。

从图 8 和图 9 可知, 1965 年代以前, 东亚地区 X 是逐年增强的, Y 分量是逐年下降的; 1965 年代以后, X 和 Y 的长期变化的空间分布变得较前复杂, 尤其是在蒙古和中国地区更为复杂。由图 10 和表 2 可见, 1955—1965 年代, 东亚磁异常区 Z 的强度在逐年增强, 其中心处增长速度由 21 nT/年降为 6 nT/年左右; 1965 年代开始, Z 的强度在逐年减弱, 开始以较快的速度下降 ($\dot{Z} = -28 \text{ nT/year}$), 1970 年代以后至 1975 年, 下降速度减缓为 -19 nT/year 。

如前所述, 东亚磁异常无论从强度看, 还是从占据的空间范围看, 都是全球九大磁异常中之最大者。因此, 国际参考场模式应能基本上反映这一地区的地磁基本场及其长期变化的情况。作为本方法的一个应用例子, 本文利用 1965.0 和 1975.0 年代的 IGRF 模式计算并绘制了东亚地区 1955—1975 年代期间的非偶极场 X 、 Y 、 Z 等值线图(图 5—图 7)及年变率 \dot{X} 、 \dot{Y} 和 \dot{Z} 等变线图(图 11—图 13), 并与相应的由台站观测值计算、绘制的等值线和等变线进行了粗略的对比。

比较图 2 和图 5、图 3 和图 6 可看出, 在东亚地区, 用本文方法和用 IGRF 模式计算、绘制的 X 、 Y 等值线的整体形态基本一致, 其空间分布几乎没有差别。1965 年代以前 Z 强度增长率不大, 1965 年代以后 Z 在衰减, 与 IGRF 模式给出的结果(图 7)相反。

由 IGRF 长期变化模式算出的 \dot{X} 、 \dot{Y} 和 \dot{Z} 在东亚地区的分布都比较规则; 而本文方法计算的等变线却复杂得多, 尤其是 1965 年代以后, 等变线变得更复杂, 例如中国地区, 由本文方法得到的等变线与 1965 年代的 IGRF 模式差别较大。但是在 1975.0 年代两者都拟合得较好。

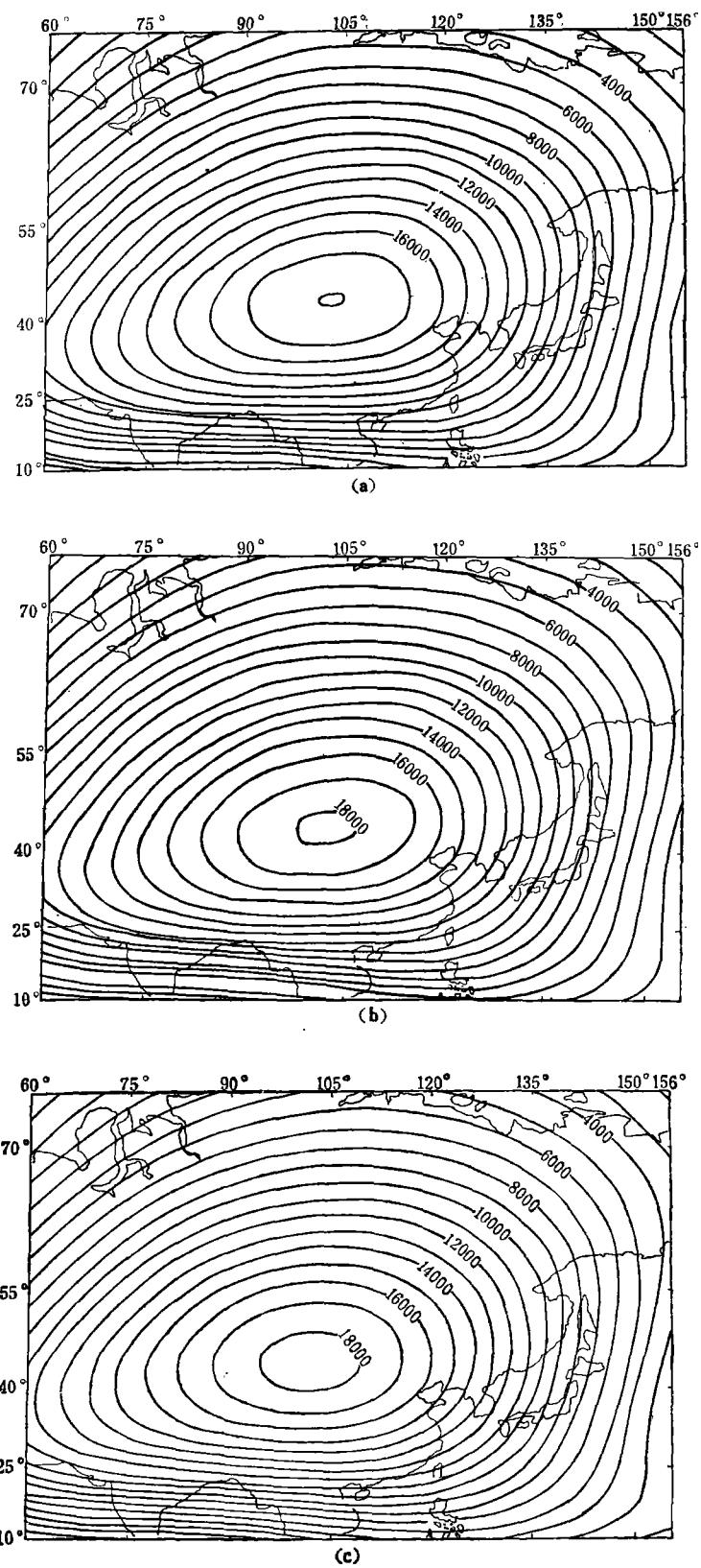


图 7 各年代非偶极场 Z 分量等值图(由 IGRF 算出)

中国知网 <https://www.cnki.net> (a) 1960.0 年代; (b) 1965.0 年代; (c) 1975.0 年代.

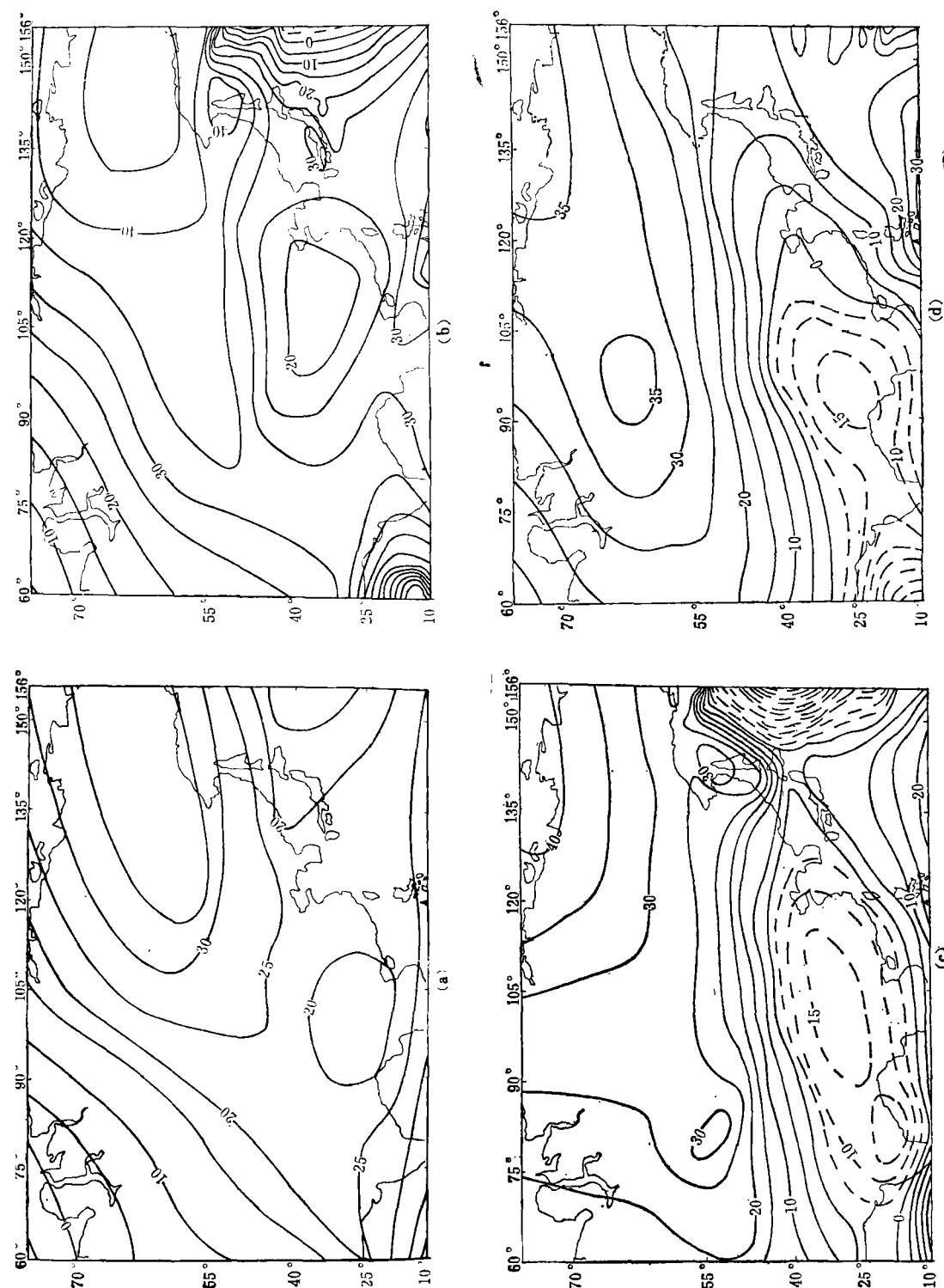


图 8 各年代非偶极场 X 分量等变图
 (a) 1955.0—1960.0年代；(b) 1960.0—1965.0年代；(c) 1965.0—1970.0年代；(d) 1970.0—1975.0年代。

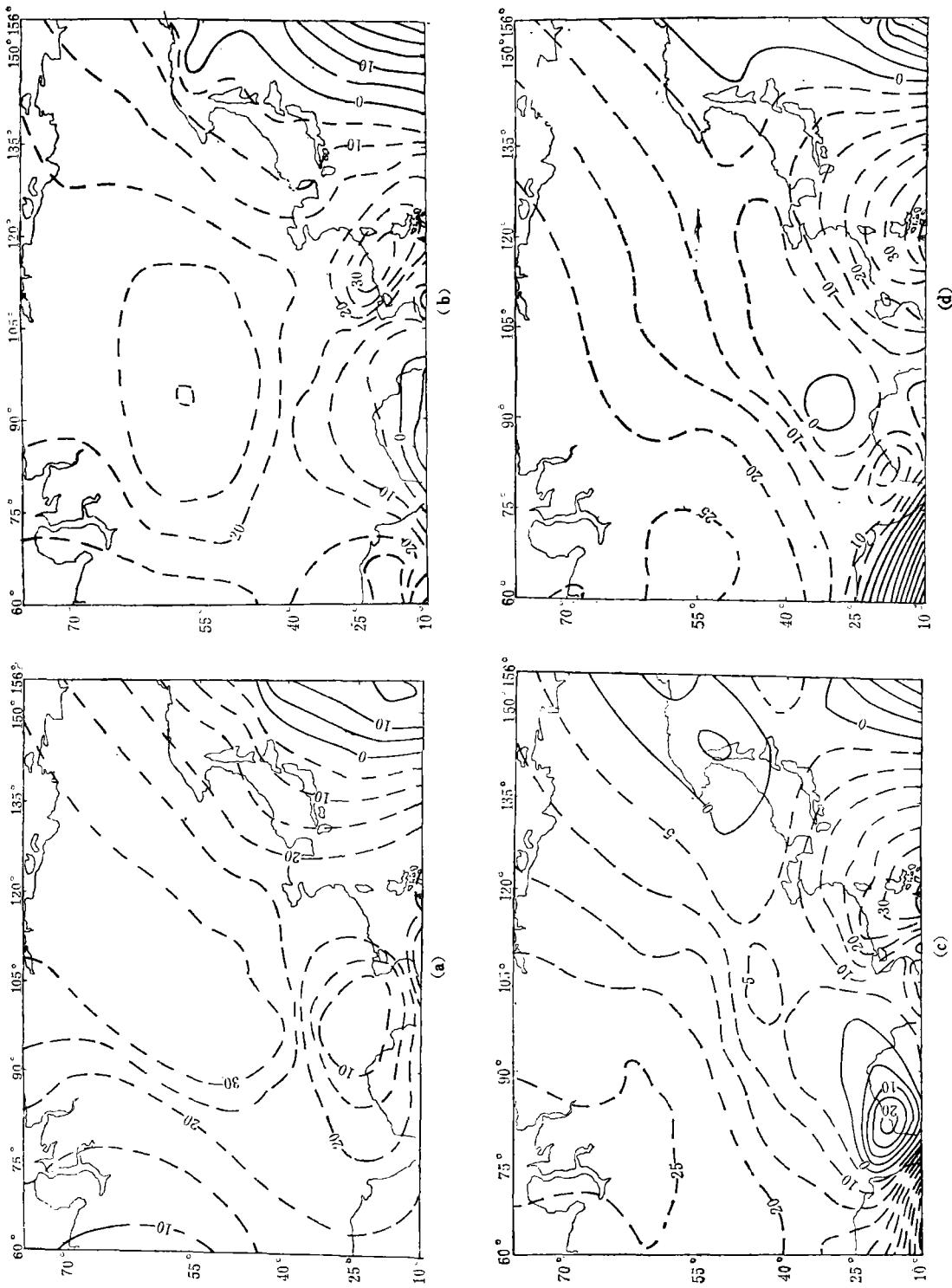


图 9 各年代非偶极场 Y 分量等变图
 (a) 1955.0—1960.0年代; (b) 1960.0—1965.0年代;
 (c) 1965.0—1970.0年代; (d) 1970.0—1975.0年代。

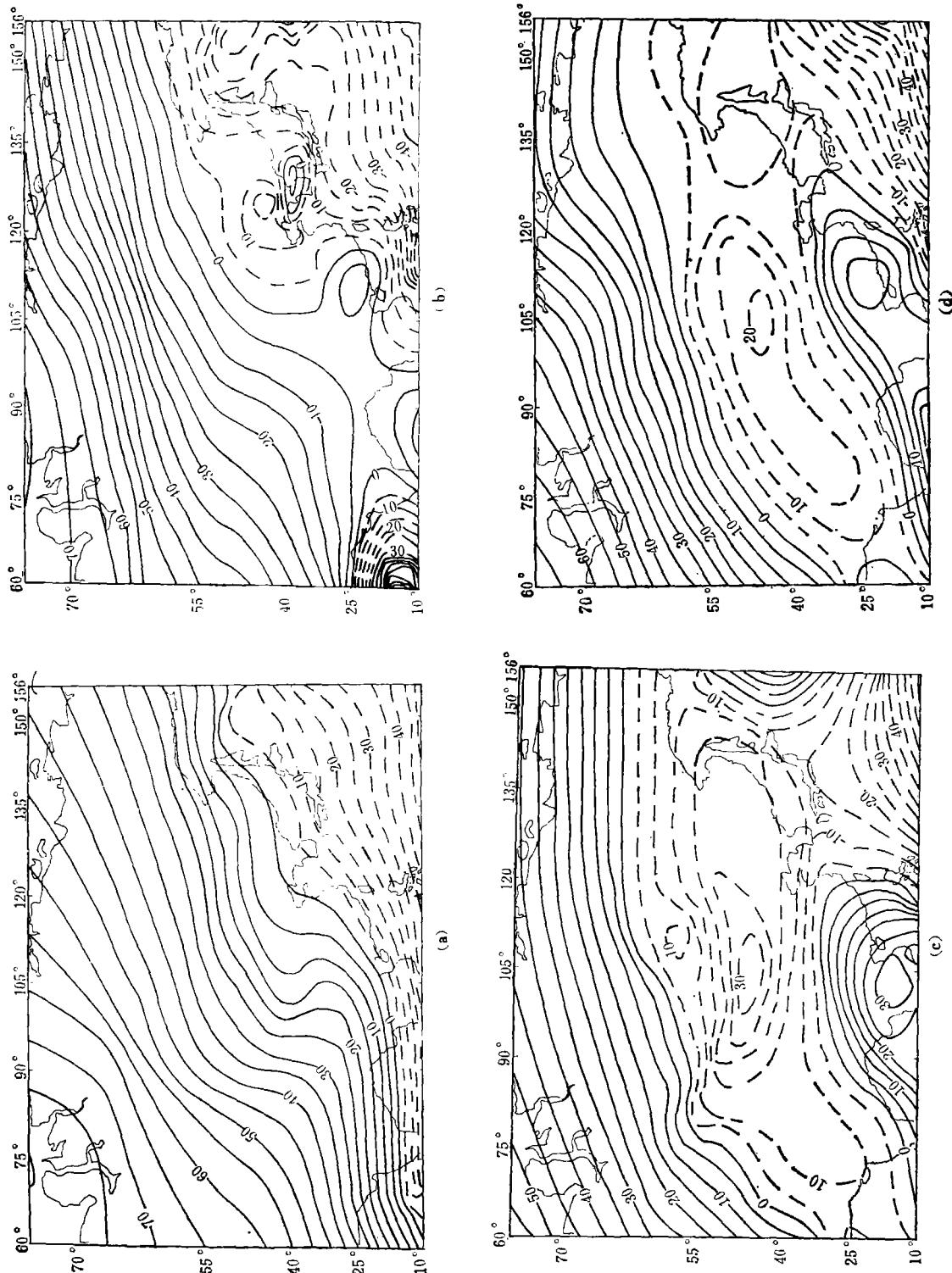


图 10 各年代非偶极场 Z 分量等变图
 (a) 1955.0--1960.0 年代; (b) 1960.0--1965.0 年代; (c) 1965.0--1970.0 年代; (d) 1970.0--1975.0 年代。

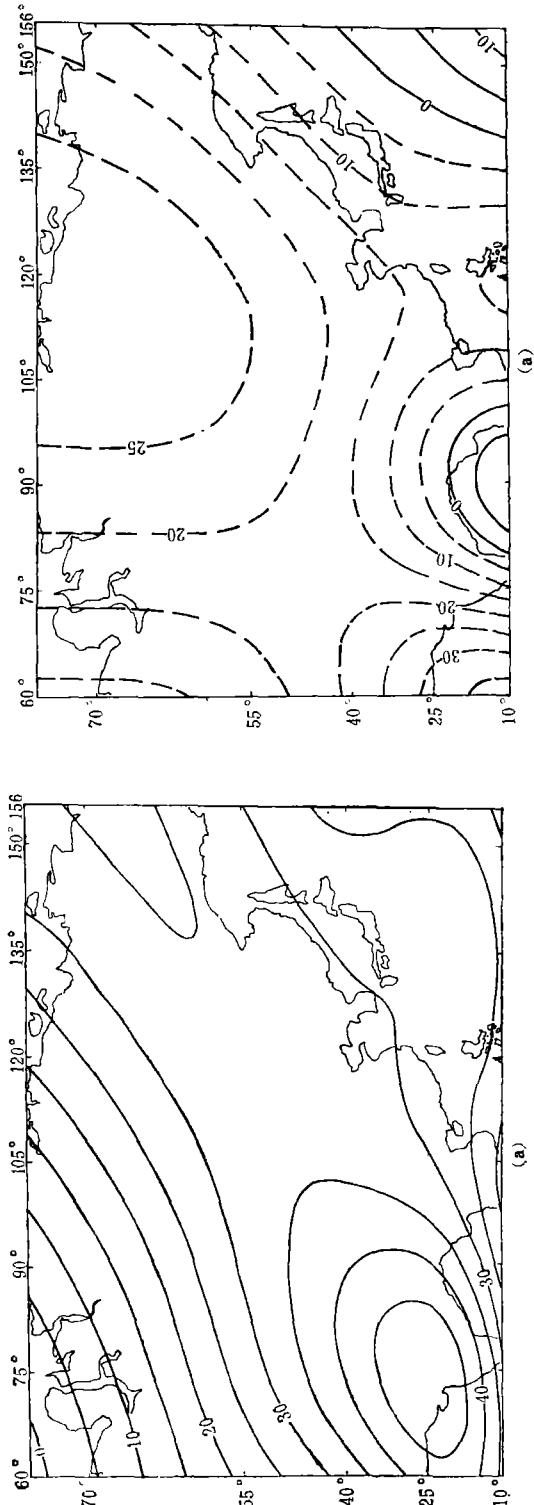


图 11 由各年代 IGRF 模型算出的非偶极场 X 分量等变图
 (a) 1965.0 年代; (b) 1975.0 年代.

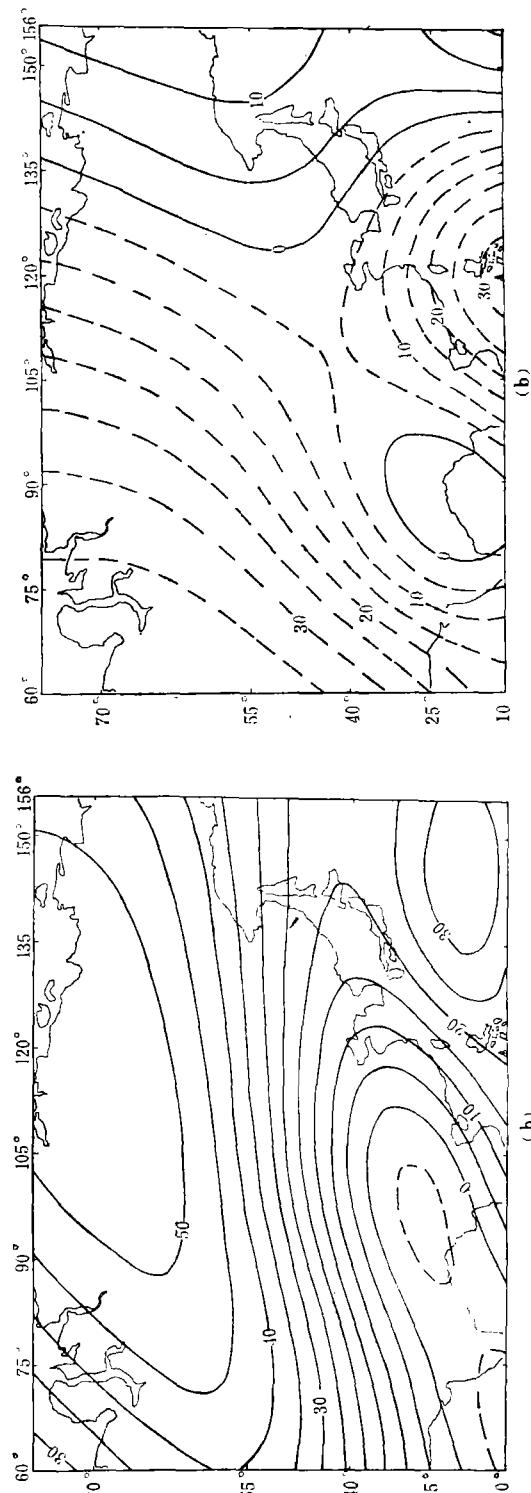


图 12 由各年代 IGRF 模型算出的非偶极场 Y 分量等变图
 (a) 1965.0 年代; (b) 1975.0 年代.

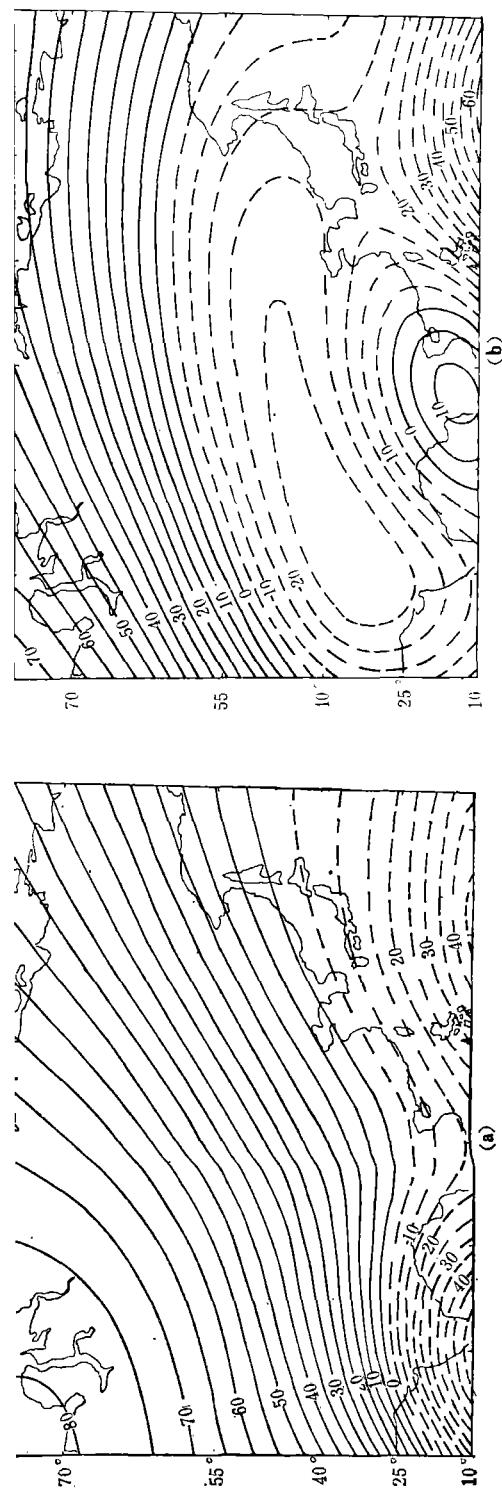


图13 由各年代 IGRF 模型算出的非偶极场Z分量等变图
(a) 1965.0年代; (b) 1975.0年代。

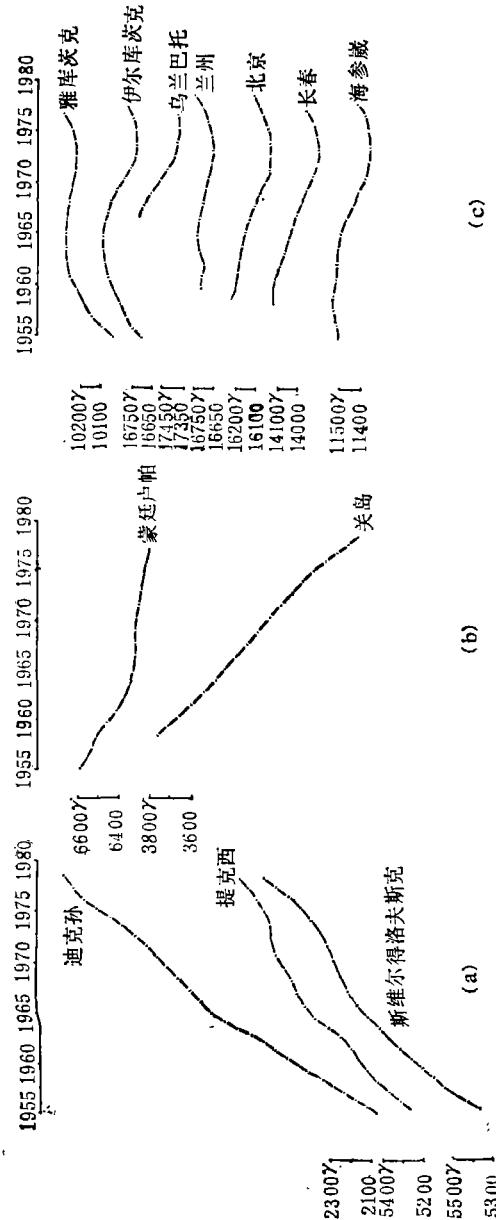


图14 某些台站Z分量的逐年变化曲线
(a) I类—单调上升型; (b) II类—单调下降型; (c) III类—转折型。

四、主要结果和讨论

1. 由本文的计算分析得到东亚磁异常中心位置为 $\lambda = 101^\circ\text{E}$, $\varphi = 44^\circ\text{--}45^\circ\text{N}$, 该处北向分量、东向分量和垂直分量在各年代期间的年变率 (\dot{X} 、 \dot{Y} 、 \dot{Z}) 如表 2 所示.

表 2 东亚磁异常中心处 \dot{X} 、 \dot{Y} 、 \dot{Z} 的变化情况 (单位: nT/年)

年 代	由 本 文 结 果			由 IGRF 模 式			备 注
	\dot{X}	\dot{Y}	\dot{Z}	\dot{X}	\dot{Y}	\dot{Z}	
1955.0—1960.0	24.0	-31.0	21.0				
1960.0—1965.0	22.6	-23.0	6.4				
1965.0—1970.0	2.0	-4.6	-28.0	35.2	-19.1	27.6	1965.0 年代模式
1970.0—1975.0	3.6	-5.0	-18.6	13.6	-6.0	-26.0	1975.0 年代模式
1975.0—1977.0	21.4	-2.5	5.6				

由表 2 可知, 1955—1965 年代 Z 的增长速率在减小; 1965 年代以后, Z 的强度约以 $(19\text{--}28)\text{nT/年}$ 的速率衰减. 这有别于文献 [9] 中所说“中心地区的 Z , 五十年代以来一直在减小”的结论.

2. 从整体看, 东亚地区地磁非偶极场虽然形态与 IGRF 给出的结果基本吻合, 但长期变化有明显差异. 1965.0 年代的 IGRF 长期变化模式与实测结果偏差甚大.

我们作出各台 Z 的逐年变化曲线(图 14), 发现在 1955—1977 年期间, Z 分量有三种不同的空间分布(见图 1): I 类——单调上升型, II 类——单调下降型和 III 类——转折型, 东亚磁异常中心部分恰好在这一地区. 由以上分析可知, IGRF 长期变化模式对 I、II 类地区适用, 而对转折型的 III 类地区的转折时期前后不适用.

由此可见, 在地磁场单调变化地区(即 I、II 类地区), IGRF 模式与实测结果较为一致, 即使缺少该区的部分资料, 对 IGRF 模式的建立也不会造成明显的影响. 但是, 如果在地磁变化复杂地区(如 III 类地区), 若缺少该区的资料, 则会影响 IGRF 模式的结构和精度.

鉴于上述情况, 本文作者认为: 为了使 IGRF 模式更好地拟合地磁长期变化处于转折时期的复杂地区的情况, 看来时间间隔应更短些, 例如 5 年为好. 采用现在通用的方法是不适宜的. 这正与 Norman W. Peddie^[10] 的观点不谋而合. 所以在建立 IGRF 模式时, 应尽量使用地磁场处于变化复杂时期的地区(如转折型地区)的资料, 以提高模式与实测结果拟合的精度.

参 考 文 献

- [1] Yukutake, T. and Tachinaka, H., The non-dipole part of the earth's magnetic field, *Bull. Earthquake Res. Inst. (Tokyo Univ.)*, **46**, 1027—1074, 1968a.
- [2] Yukutake, T., Review of the geomagnetic secular variations on the historical time scale, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **20**, 83—95, 1979.
- [3] IAGA Commission 2 Working Group 4 on Analysis of the Geomagnetic Field, IGRF 1965.0, *IAGA Bull.*, No. 28., 1971.

- [4] IAGA Division 1 Study Group on Geomagnetic Reference Fields, International Geomagnetic Reference Field 1975, *J. Geomag. Geoelectr.*, **27**, 437—439, 1975.
- [5] Пушкин, А. Н., Ивченко, М. П., Сводные Таблицы Среднего Довных Значений Магнитных Элементов Мировой Сети Магнитных Обсерваторий, Выпуск XII, Институт Земного Магнетизма, Ионосферы и Распространения Радиоволн, Академия Наук СССР., 1979.
- [6] 国家地震局地球物理研究所, 地磁观测报告 (1958—1977), 地震出版社, 1979.
- [7] 杨学平编著, 计算机绘图, 电力工业出版社, 1980.
- [8] 方俊, 地图投影学, 科学出版社, 1957.
- [9] 任国泰, 关于东亚大陆磁场的研究, 地球物理学报, **24**, 404—413, 1981.
- [10] Norman W. Peddie, International Geomagnetic Reference Field 1980: A Report by IAGA Division I Working Group 1., *J. Geomag. Geoelectr.*, **33**, 607—611, 1981.

ANALYSIS OF SECULAR VARIATIONS OF NON-DIPOLE GEOMAGNETIC FIELD IN EAST ASIA

LIN YUN-FANG ZENG XIAO-PING GUO QI-HUA

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing, China)

Abstract

In this paper we have used the non-dipole geomagnetic field components X , Y , Z derived from the observational annual values of the three elements D , H , Z from 1955 to 1977 of 50 observatories in East Asia and its vicinity, and applied the method of distance-dependent weights and least square surface fitting to the calculation, graph and analysis of the non-dipole geomagnetic field in East Asia, its secular variations, and its temporal and spatial characteristic features, and compared the obtained results with the model of the International Geomagnetic Reference Field (IGRF). The main results are: (1) in the period from 1955 to 1965 the increase of values of Z intensity in East Asia is rapidly decreasing, and the Z value has decreased year by year since 1965. (2) on the whole, though the features of the non-dipole geomagnetic field in East Asia are basically similar to that derived from the IGRF model, the secular variations appear evidently different. The IGRF model in 1965 departed from the observational results considerably. In order to fit the IGRF model better to the actual complex geomagnetic secular variations in the turning region, it seems that the time interval should be shorter, say five years, and other current methods might not be applicable in this case.