

徐文耀,杜爱民,陈耿雄. 地球非偶极磁场对虚地磁极计算的影响. 地球物理学报, 2007, 50(5):1298~1303

Xu W Y, Du A M, Chen G X. Effect of non-dipole field on VGP estimation. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(5):1298~1303

地球非偶极磁场对虚地磁极计算的影响

徐文耀,杜爱民,陈耿雄

中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

摘 要 古地磁学使用的虚地磁极(VGP)是在地心偶极磁场假设下计算的,由于地球非偶极磁场的存在,VGP一般不同于真地磁极(RGP).为了定量检验非偶极磁场对VGP的影响,本文利用国际参考地磁场模型 IGRF 1900~2000,在全球 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 的“虚拟测点”网格上计算了VGP和RGP的位置,并求出两种磁极的经纬度偏差和二者的角距离.结果表明,南极地区VGP与RGP的角距离最大,可达 26° ,南大西洋和欧亚大陆北部最大达到 24° 和 18° ,其余地区一般小于 15° .VGP对RGP的偏差与地磁场分布有关:在非偶极磁场较弱的地区(如太平洋半球),纬度偏差一般不大(10°),但是在主要地磁异常区(如南大西洋和南极地区),VGP对RGP的纬度偏差可达 25° .VGP对RGP的经度偏差要比纬度偏差大得多,例如在欧亚大陆北部地区,经度偏差分布在 -180° 到 180° 的大范围内.

关键词 主磁场,偶极磁场,非偶极磁场,古地磁学,虚地磁极(VGP),真地磁极(RGP)

文章编号 0001-5733(2007)05-1298-06 中图分类号 P318 收稿日期 2006-11-21,2007-06-27收修定稿

Effect of non-dipole field on VGP estimation

XU Wen-Yao, DU Ai-Min, CHEN Geng-Xiong

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract The virtual geomagnetic pole (VGP) calculated under the assumption of a central dipole field is generally different from the real geomagnetic pole (RGP) since effect of the non-dipole field. In order to quantitatively examine effects of the non-dipole field on VGP determination, the VGP and RGP are calculated at $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ virtual sites by using the IGRF 1900~2000 models. The results show significant departures of VGP from RGP in some major magnetic anomaly regions. The latitude departures of VGP from the RGP are as large as 25° in these anomaly regions, although they are acceptable in most sites on the earth's surface (less than 10°), mainly confined in the regions with a weak intensity of the non-dipole field, such as Pacific Ocean. The longitude departures of VGP from RGP are much more remarkable, scattering in a wide range from -180° to 180° in Eurasian continent. The angle distance between VGP and the RGP are generally within a range of 15° , except the Antarctica, South Atlantic Ocean and Eurasia regions.

Keywords Main geomagnetic field, Dipole field, Non-dipole field, Paleomagnetism, VGP, RGP

1 引 言

如果地磁场是一个地心偶极子场,则地磁场的方向、强度和地磁极位置可由一点的磁偏角、磁倾角

和磁场强度完全确定.由于地磁场还包括非偶极场部分,所以这样计算的结果与真实地磁场的值不同.古地磁学把地心偶极子场假设下计算得到的地磁极叫做“虚地磁极”(Virtual Geomagnetic Pole,简记作VGP)^[1~4].与此相对应,真实磁场的地磁极叫“真地

基金项目 国家自然科学基金项目(40436016)资助.

作者简介 徐文耀,男,1944年生,1966年毕业于西安交通大学数理系,1983年于中国科学院地球物理研究所获理学博士学位.从事地磁与空间物理研究. E-mail: wyxu@mail.igcas.ac.cn

磁极”(Real Geomagnetic Pole, 简记作 RGP)。

为了提高结果的可靠性,通常要将一个岩体不同部分样本的 VGP 加以平均,然后将一定空间范围、一定时间段的结果再平均,得到古地磁极和视极移路线(APWP)^[3-5]。由于同样的原因,平均 VGP 通常也不同于 RGP。由于古地磁极的移动常常用来推断地块的相对运动^[6,7],因此,定量估计 VGP 和古地磁极的误差是十分必要的。

影响 VGP 的重要原因之一是非偶极磁场。但是,由于缺乏地质年代真实地磁场的详细资料,所以,只用古地磁资料本身,很难确切估计非偶极磁场对 VGP 的影响。为了定量检验非偶极磁场的影响,本文利用国际参考地磁场模型 IGRF 1900~2000 来近似代表 100 年来地磁场的真实分布,在 $5^\circ \times 5^\circ$ 的全球“虚拟测点”上计算 VGP,并对 VGP 与 RGP 的经纬度差异和角距离进行分区检验,以便对 VGP 与 RGP 差异有一个定量的认识。当然,100 年与地质年代相比非常短暂,但本文结果至少可提供一个数值参考。

2 全磁场和偶极磁场的偏角与倾角

在地球表面附近,主磁场的标量位可以表示成球谐级数形式^[8,9]:

$$U(t, r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)] P_n^m(\cos \theta), \quad (1)$$

式中 r , θ 和 λ 分别表示地心距、余纬和经度, a 是地球半径(6371.2 km), $P_n^m(\cos \theta)$ 是 n 阶 m 次缔合勒让德函数, $g_n^m(t)$ 和 $h_n^m(t)$ 是高斯系数^[6-8]。高斯级数的截断水平通常取为 $N_{\max} = 10$ 或 13。

公式(1)表示的全磁场可以分成偶极磁场(DP)和非偶极磁场(NDP)两部分,前者由级数中 $n=1$ 的三项表示,后者由其余项表示。由于高斯系数 g_1^0 远大于其他系数,所以地磁场近似为一个地心偶极磁场,地磁轴与地理轴有大约 11° 的夹角。偶极轴与地表的交点称为“地磁极”(Geomagnetic pole),本文称之为“真地磁极”(RGP),以便与古地磁测量的虚地磁极 VGP 相区别。

国际参考地磁场(IGRF)是由(1)式表达的主磁场模型系列^[10],是对全球大尺度磁场分布的很好近似。由于全磁场中包含非偶极场,所以,全磁场的偏角和倾角一般不等于偶极场的偏角和倾角。图 1

(a1, b1) 表示偶极场的偏角 D 和倾角 I ,图 1(a2, b2)是全磁场 IGRF 的 D 和 I ,图 1(a3, b3)是二者之差。图 1 显示,偶极场的 D 和 I 呈现很好的规则分布,而全磁场 D 和 I 的分布则有明显畸变。 D 畸变主要发生在两极地区,在地磁极附近,全磁场对偶极场的最大 D 偏差分布在 -180° 到 180° 的大范围内,在欧亚大陆西北部和南印度洋也可看到很大的 D 偏差。倾角分布畸变主要发生在南大西洋地区,全磁场对偶极场的最大 I 偏差超过 35° ,南极地区的最大 I 偏差超过 15° 。可以预料,这些差异必然会引起 VGP 偏离 RGP。

在偶极磁场中,已知地面一测点的偏角 D 和倾角 I ,即可用下面的公式计算出地磁极的位置:

$$\cos \theta_0 = 0.5 \tan I, \quad (2)$$

$$\cos \lambda_0 = \cos \lambda \cos D + \sin \lambda \sin D \cos \theta, \quad (3)$$

$$\lambda_0 = \pm \arccos \left(\frac{\cos \lambda \cos D + \sin \lambda \sin D \cos \theta}{\sin \theta} \right), \quad (4)$$

$$(+ \text{ for } D > 0, - \text{ for } D < 0),$$

式中, (λ, θ) 是测点的地理余纬和经度, (λ_0, θ_0) 是地磁极的地理余纬和经度, θ 是测点的地磁余纬。可以看出, VGP 与测点的角距离决定于测点的磁倾角,而测点磁偏角则给出 VGP 相对于测点的方向(图 2)。

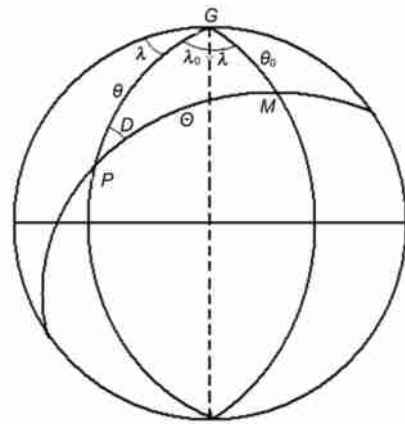


图 2 计算 VGP 用的球面几何

Fig. 2 Geometry for VGP calculation

在古地磁应用中,一个测点的偏角和倾角是在该测点采集的岩石样品的磁化方向测量值推算出来的,显然,它应该是岩石形成时全磁场的属性,而不是偶极场的值。于是我们看到,公式(2)~(4)是偶极磁场公式,而代入的已知量(偏角和倾角)却是全磁场的,这样得到的地磁极不是真地磁极 RGP,而是虚地磁极 VGP。

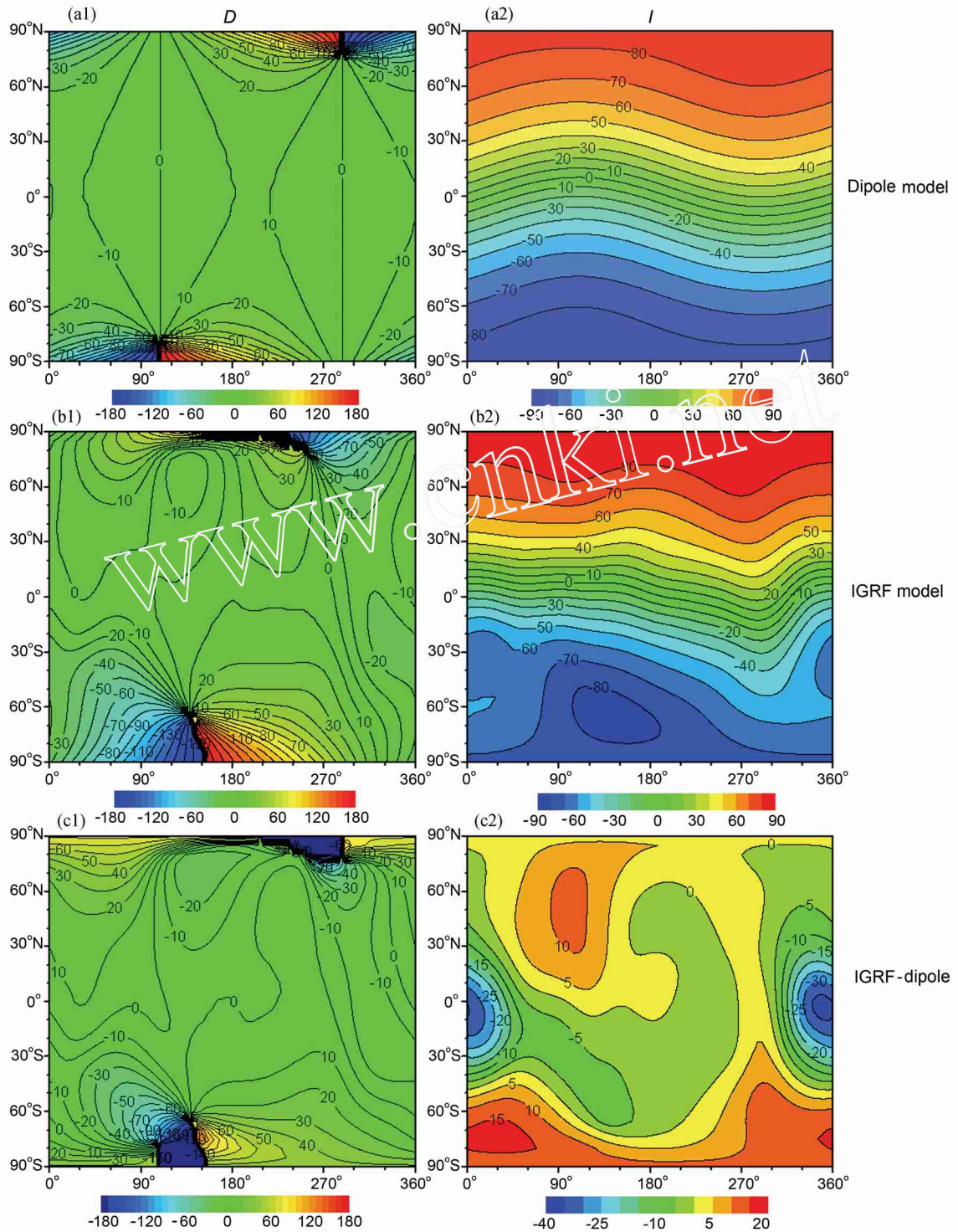


图 1 2000 年偶极磁场 (Dipole) 和全磁场 (IGRF) 偏角 D 和倾角 I 的比较
 (a1, b1) 表示偶极场的 D 和 I , (a2, b2) 是全磁场的 D 和 I , (a3, b3) 是二者之差。

Fig. 1 Comparison of declination and inclination of the dipole field and the whole IGRF field

3 分析结果

3.1 2000 年代 VGP 对 RGP 的偏差

IGRF 1900 ~ 2000 包括 1900 ~ 2000 年期间的 21

个主磁场模型, 每 5 年一个。对每个模型, 我们按照公式 (2) ~ (4), 由模型的 D 和 I 值, 计算出 $5^\circ \times 5^\circ$ 全球虚拟测点网格上的 VGP。图 3 是 IGRF 2000 的结果, 其他年代的结果与此类似, 本文没有一一画出, 不同年代之间的差异可以从后面图 6 看出。

图 3 中的散点表示由网格点的 D 和 I 计算出的 VGP,五角星表示 IGRF2000 真地磁极 RGP(79.54°N, 71.57°W). 数字 1~5 表示不同区域的结果:1(黑点)表示中太平洋地区(45°S~45°N, 120°E~300°E), 2(红点)表示欧亚大陆地区(30°N~85°N, 30°E~130°E), 3(桔黄点)南极地区(85°S~30°S, 0°~120°E), 4(粉点)南大西洋地区(40°S~20°N, 300°E~360°E), 5(蓝点)其他地区.

从图 3 可以看到, VGP 大体上围绕着 RGP 分布,但多数情况下,二者偏差较大.其中南极地区纬度偏差达到 25°;南大西洋地区的经度偏差和纬度偏差都较大;欧亚大陆的纬度偏差不大,但经度偏差很大;太平洋地区的经度偏差和纬度偏差都较小.

为了更清楚地显示 VGP 对 RGP 的偏差,图 4a 和 4b 分别给出 2000 年纬度偏差和经度偏差的全球分布图.为了使等值线连续变化,图 4b 中画出的是经度偏差的绝对值.

图 4a 显示,在整个北半球, VGP - RGP 的纬度偏差最大不超过 10°,大部分地区的偏差为正(即 VGP 纬度高于 RGP 纬度),只有美洲及其邻近的西大西洋和东太平洋地区为负.在南半球,纬度偏差基本为负,主要磁异常区的偏差明显增大:南大西洋地区最大纬度偏差超过 16°,而南极地区更大,甚至可以达到 25°.由这些特点,我们可以设想,用 2000 年北半球形成的岩石或沉积物定出的 VGP 纬度比 RGP 偏高,而南半球岩石则给出偏低的 VGP 纬度.

VGP 对 RGP 的经度偏差可能在 $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$ 的大范围内变化,欧亚大陆的北部的偏差最大.

VGP 和 RGP 之间的角距离 可以综合地描述 VGP 对 RGP 的经纬度偏差.图 5 给出 2000 年的全球分布.可以看到,在非偶极磁场较弱的太平洋地区,角距离 一般较小^[4],而在非偶极磁场较强的地区 较大:南极地区最大 超过 26°,南大西洋地区超过 24°,欧亚大陆北部地区超过 18°.其余地区的一般小于 15°.

3.2 1900~2000 年 VGP 视极移路线

上述结果给出 2000 年一个年代的 VGP 特点.如果我们追踪不同年代 VGP 的变化,则可得到 VGP 视极移路线 APWP.

由 IGRF 1900~2000 模型,可以计算出 120°E 中国地磁台链 10 个台站的 D 、 I 、VGP 和 APWP,如图 6 所示.为了便于比较,图中还画出了 RGP 的极移路线 RPWP,箭头表示移动方向.我们注意到,10 个台站的 VGP 分布在 83°~87°纬度范围内,比 RGP 纬度

高 5°~15°.在经度上,二者的最大偏差超过 120°,出现在最北台站漠河和满洲里.随着台站纬度降低, VGP 越来越靠近 RGP.

不同台站对应的 APWP 有如此之大的差异,其原因是这些台站分布非偶极磁场的不同部位,而非偶极磁场对不同台站 VGP 的影响各不相同.显然, APWP 的这些差异并不表示在这 100 年当中台站之间发生了显著的相对运动.

4 讨 论

以上结果表明,由于非偶极场的存在, VGP 对 RGP 的偏差通常是不可忽略的.虽然本文所用资料和分析结果只限于 1900~2000 年之间,但是,所得结论可供其他时期参考.

除了地磁极性转换期之外,偶极磁场在整个地磁场中总是占绝对优势^[11].然而,地磁场中的非偶极场部分可以使实际磁场的偏角和倾角显著地偏离偶极磁场的偏角和倾角,在主要的磁异常区(如南大西洋、欧亚大陆和南极大陆地区),这种偏差更为显著.正是这种偏差,造成了 VGP 对 RGP 的偏差.

古地磁研究的一个重要问题是寻求样品剩磁特征与地磁场的关系.由于无法获得地质时期真实地磁场的准确而详细的观测资料,我们只好采用地心偶极场近似,由岩石样本的偏角和倾角测值,经过一系列的改正,来计算 VGP.

VGP 与 RGP 之间存在差异是毫无疑问的,问题在于如何恰当而正确地估计这个差异.在同一岩体的不同部位采集样品并将结果加以平均,可以减小取样误差和测量误差,但是不能得到 VGP 与 RGP 差异的估计值.同样,将一段时间内某地块的结果加以平均,可以得到该时段该地块 VGP 的平均位置及其相对误差,但是仍然不能确切知道 VGP 与 RGP 的差异.更长时间的平均结果告诉我们,地球磁极离地理极不远,但是我们不能将长时期的平均结果用于每一个短时期.

现代磁场模型为 VGP 与 RGP 的差异估计提供了可用的资料基础.本文利用 IGRF 1900~2000 共 100 年的地磁场模型序列,定量地估计了 VGP 与 RGP 的纬度和经度差异.应该指出的是,由于 IGRF 模型有一定的截断水平,它只包括偶极场和大尺度非偶极场,而没有包括小尺度岩石圈异常的贡献.可以预料,这些小尺度地壳异常将会使某些区域的 VGP 对 RGP 偏离增大,偏离值的分布也更趋复杂.

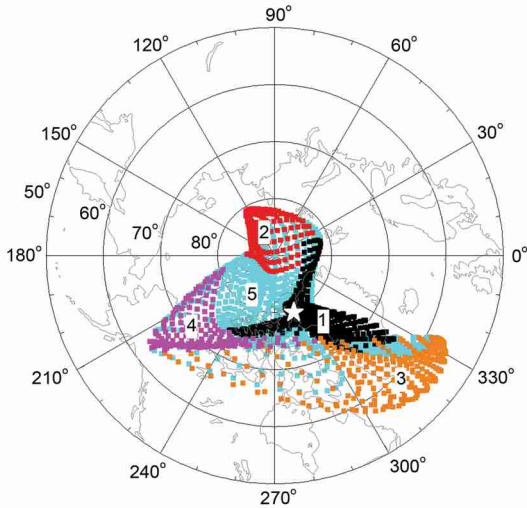


图 3 由 IGRF 2000 模型的偏角 D 和倾角 I 计算出的虚地磁极 VGP (散点)

图中的五角星表示真地磁极 RGP 位置。四个圆圈从外向内分别表示 50° 、 60° 、 70° 和 80° 四个纬度圈。数字 1~5 分别表示不同区域的结果: 1 (黑点) 中太平洋地区, 2 (红点) 欧亚大陆地区, 3 (桔黄点) 南极地区, 4 (粉点) 南大西洋地区, 5 (蓝点) 其他地区。

Fig. 3 VGP determined from D and I of IGRF 2000

The star marks the location of RGP. The four circles represent the latitudes 50° , 60° , 70° and 80° , respectively. The numbers 1 to 5 represent the results for different regions: 1 (black) for central Pacific Ocean, 2 (red) for Eurasian continent, 3 (orange) for the Antarctica, 4 (pink) for South Atlantic Ocean, and 5 (blue) for other regions.

我们可以提高 IGRF 截断水平, 甚至可以把岩石圈磁场也包括进来, 以得到更接近实际的磁场。我们也可以对一些人工合成的地磁场模型进行类似的计算, 在更大的磁场变动范围内讨论 VGP 和 RGP 的差异。

我们甚至可以构建假想的极性转换期地磁场模型, 并研究转换期 VGP 的特性。不过需要注意, 在偶

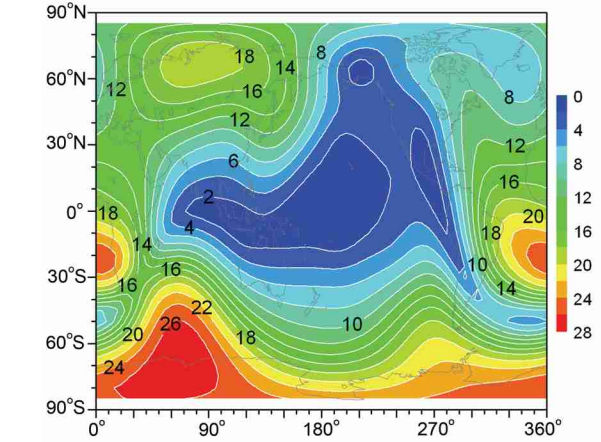
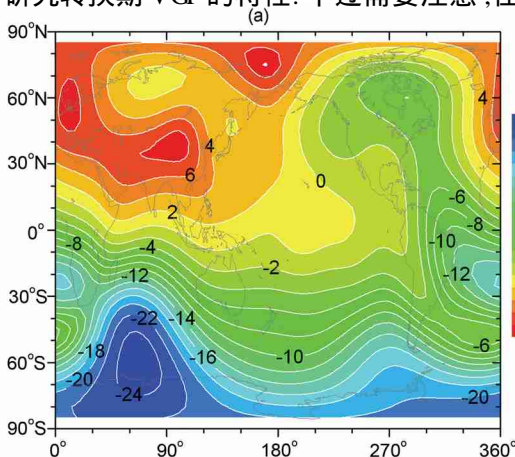


图 5 2000 年 VGP 与 RGP 角距离 的全球分布
Fig. 5 Global distribution of the angle distances between VGP and RGP for 2000

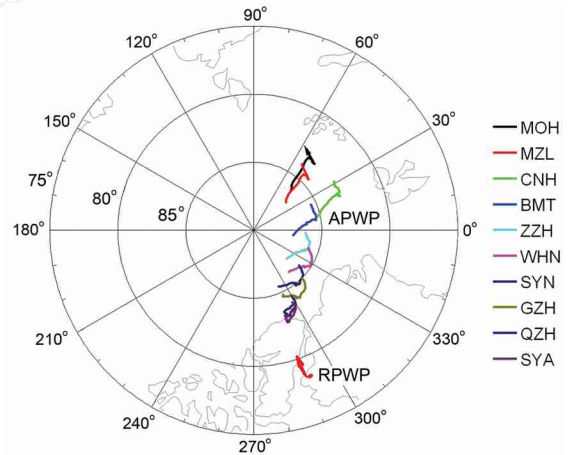


图 6 在 1900~2000 期间, 中国 120°E 地磁台链 10 个台站的 VGP 视极移路线 (APWP) 与 RGP 极移路线 (RPWP) 的对比
Fig. 6 Comparison of APWP with RPWP for 10 sites along 120° meridian chain of China for 1900~2000

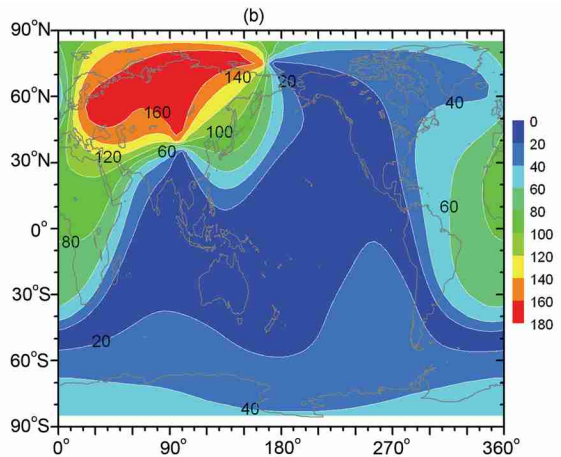


图 4 2000 年 VGP 对 RGP 的纬度偏差 (a) 和经度偏差 (b, 绝对值)

Fig. 4 Departures of VGP from the RGP in latitude (a) and longitude (b, absolute values)

极磁场不占优势的情况下, VGP 的含义与优势偶极子情况大不相同。

5 结 论

本文用 IGRF 1900 ~ 2000 模型研究了 1900 ~ 2000 年 100 年期间虚地磁极 VGP 与真地磁极 RGP 的差异, 得到如下结论:

(1) 在北半球, VGP 对 RGP 的纬度偏差大都为正, 即 VGP 纬度高于 RGP 纬度, 最大不超过 10° ; 在南半球, 纬度偏差基本为负, 南极地区和南大西洋等主要磁异常区的纬度偏差明显增大, 最大可达 25° 。

(2) 一般说来, VGP 对 RGP 的经度偏差要比纬度偏差大得多, 在欧亚大陆, 经度偏差散布在 -180° ~ 180° 的大范围内。

(3) VGP 与 RGP 的角距离在南极地区最大, 可达 26° , 在南大西洋和欧亚大陆北部最大达到 24° 和 18° , 其余地区一般小于 15° 。

致 谢 作者衷心感谢朱岗崑、朱日祥、潘永信、黄宝春等先生批评指正。

参考文献 (References)

- [1] Guyodo Y, Valet J P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr. *Nature*, 1999, **399**: 249 ~ 252
- [2] Merrill R T, McFadden P L. Geomagnetic polarity transitions. *Rev. Geophys.*, 1999, **37**(2): 201 ~ 226
- [3] 朱岗崑. 古地磁学——基础、原理、方法、成果与应用. 北京: 科学出版社, 2005
- Tschu K K. Paleomagnetism—Fundament, Principles, Methods, Achievements and Applications (in Chinese). Beijing: Science Press, 2005
- [4] Parkinson W D. Introduction to Geomagnetism. Scottish Academic Press, 1983. 85 ~ 88
- [5] Fisher R A. Dispersion on the sphere. *Proc. Roy. Soc., London*, 1953, **A217**: 295 ~ 305
- [6] McEhinny M W. Paleomagnetism and Plate Tectonics. London: Cambridge University Press, 1973
- [7] Irving E. Paleomagnetism and Its Application to Geological and Geophysical Problems. New York: John Wiley & Sons, 1964
- [8] Chapman S, Bartels J. Geomagnetism. London: Oxford University Press, 1940
- [9] Langel R A. The Main Field. In: Jacobs J A ed. Geomagnetism, Vol. 1. London: Academic Press, 1987. 249 ~ 512
- [10] IAGA Division 5 Working Group 8. International geomagnetic reference field 2000. *Geophys. J. Int.*, 2000, **141**(1): 259 ~ 262
- [11] Lowes F J. Spatial power spectrum of the main geomagnetic field, and extrapolation to the core. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1974, **36**: 717 ~ 730

(本文编辑 何 燕)

[1] Guyodo Y, Valet J P. Global changes in intensity of the Earth's