

康国发,高国明,白春华等. 中国及邻近地区 CHAMP 卫星磁异常的分布特征. 地球物理学报, 2010, **53**(4):895~903, DOI:10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 04. 014

Kang G F, Gao G M, Bai C H, et al. Distribution of the magnetic anomaly for the CHAMP satellite in China and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(4):895~903, DOI:10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 04. 014

中国及邻近地区 CHAMP 卫星磁异常的分布特征

康国发¹, 高国明¹, 白春华², 王 军¹, 邵 丹¹

1 云南大学地球物理系, 昆明 650091

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文利用 CHAMP 卫星磁测资料建立的新一代高阶地磁场模型 POMME-4. 2S, 计算中国及邻区 400 km 高度的卫星磁异常及其垂直梯度, 给出 7 个磁场分量的分布图, 比较了截断水平对磁异常分布的影响, 初步分析了磁异常与岩石圈构造的关系. 主要结果表明, 在四川盆地、塔里木盆地和松辽盆地等主要磁异常区, ΔZ 异常中心的南北两边出现 ΔX 的异常中心, 东西两边出现 ΔY 的异常中心. 在球谐模型为 90 阶时, 磁异常分布的基本形态已经确定, 更高的模型阶数对磁异常只有微小调整. 在磁异常较强的地区, 磁异常及其垂直梯度同步变化. 卫星磁异常与地形变化、断裂带分布、莫霍面深度和岩石圈厚度没有直接的对应关系, 而与居里等温面深度、磁性层厚度有明显的相关性. 居里等温面深、磁性层较厚的地区显示正磁异常, 居里等温面浅、磁性层较薄的地区显示负磁异常.

关键词 CHAMP 卫星, 地磁场模型, 岩石圈磁场, 空间分布, 中国地区

DOI:10.3969/j. issn. 0001-5733. 2010. 04. 014

中图分类号 P318

收稿日期 2009-11-01, 2010-01-25 收修定稿

Distribution of the magnetic anomaly for the CHAMP satellite in China and adjacent areas

KANG Guo-Fa¹, GAO Guo-Ming¹, BAI Chun-Hua², WANG Jun¹, SHAO Dan¹

1 Department of Geophysics, Yunnan University, Kunming 650091, China

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

Abstract Based on the new and higher degree geomagnetic model POMME-4. 2S from CHAMP satellite data, we have calculated the satellite magnetic anomaly and its vertical gradient at 400 km altitude in China and adjacent areas. The distributions of seven magnetic components are shown. In addition, we also compared the impact of the truncation level on the magnetic anomaly and analyzed the relationship of the anomaly and the lithospheric structure. The results indicate that, the ΔX (ΔY) magnetic anomalies foci appear on the south (west) and north (east) sides of that of ΔZ , in the main magnetic anomaly areas of Sichuan, Tarim and Songliao basins. The configuration of the magnetic anomaly distribution is determined when the spherical harmonic model is up to 90 degrees, and only a minor modification to the magnetic anomaly is available for higher degrees. The anomaly and its vertical gradient are varying synchronously in the strong magnetic anomaly areas. The satellite magnetic anomaly has no direct corresponding relations with the topographic change, the zone of rupture, the depth of Moho and the thickness of the lithosphere. However, this anomaly is connected with the depth of the Curie isotherm surface

and the thickness of the magnetic layer, which is positive (negative) in the areas of deeper (shallower) Curie isotherm surface and thicker (thinner) magnetic layer.

Keywords CHAMP satellite, Geomagnetic field model, Lithospheric magnetic field, Spatial distribution, China area

1 引言

岩石圈磁场是地磁场的重要组成部分,主要由岩石的磁化强度产生^[1,2]. 由于岩石磁化特性及其构造演化的差异,岩石圈磁场携带着岩石物质成分和构造分布的信息,它一直是地质学家和地磁学者关注的重要问题之一^[3~6].

地磁场内源部分由地核主磁场、岩石圈磁场和感应场组成. 由于感应场所占比例很小,从全球磁场减去主磁场后,得到的残余磁场部分通常称为岩石圈磁场(也称为地壳磁场或地磁异常). 理论上,主磁场和岩石圈磁场还不能够完全分离. 实际观测中,主磁场和岩石圈磁场叠加在一起. 此外,岩石圈磁场分布复杂,区域性强. 因此,对岩石圈磁场的研究,传统的方法是用地磁实测值减去主磁场(例如,国际参考地磁场模型 IGRF)得出的剩余磁场,建立区域磁异常模型来研究其分布规律. 我国学者利用这种方法,对不同时期地面磁测数据进行了建模分析,得出我国区域磁异常分布^[7,8]. 但是,由于地面磁测受到自然条件限制,地磁测点数目少,加之建模中的边界效应,得出的磁异常分布远不能反映中小尺度的变化特征. 安振昌等人还利用 MAGSAT 卫星磁测数据,球冠谐和分析方法得出了中国及邻近地区磁异常分布^[9],但表示的最短空间波长也仅为 1200 km 左右,反映的空间尺度有限.

随着卫星磁测技术的进步,利用卫星对地磁场进行高密度的连续观测数据,可以建立地磁场的高阶球谐模型^[10~13]. 根据地磁场球谐模型阶次与空间波长($2\pi a/N$, N 为截止阶数, a 为地球平均半径)的关系,以及对地磁场高阶球谐模型的能谱分析,地磁学者初步得出了主磁场和岩石圈磁场分界的球谐阶次. $n \leq 13$ 为主磁场, $n = 14 \sim 15$ 为主磁场和岩石圈磁场的过渡, $n \geq 16$ 阶为岩石圈磁场^[14~21],这就为岩石圈磁场的研究提供了定量依据.

2000 年以来,德国、美国和丹麦等国的科学家利用 CHAMP、Oersted、SAC-C 和 MAGSAT 等卫星、地面和海洋磁测资料构建了多种高阶地磁场模型. 这些模型有单颗卫星资料建立的模型、多颗卫星

观测资料结合起来建立的综合模型(CM)以及利用卫星、地面磁测、海洋磁测和航磁资料构建的模型^[15~19]. 在这些磁场模型中,利用德国 CHAMP 卫星资料构建的波茨坦地磁场球谐模型(The Potsdam magnetic model of the Earth,简称 POMME)系列,随着卫星磁测资料的增加而不断更新模型系数. 其中, POMME-4.2S 模型使用 CHAMP 卫星长达 7 年(2000 年 6 月~2007 年 5 月)的高精度地磁场矢量和标量资料,并进行了海洋潮汐感应场的校正,归算到 2004.0 年,最大截止阶数 $N = 720$,可识别的最短空间波长为 56 km. 它是到目前为止使用卫星资料较长、截止阶数最高的地磁场模型.

POMME-4.2S 模型使用的卫星磁测数据主要在地表以上 450~350 km 之间的高度获得^[9],最适合表达地表以上 400 km 左右高度的磁场,用它计算的岩石圈磁场也称为卫星磁异常. 本文利用 POMME-4.2S 模型,给出岩石圈磁场的能谱特征,计算并分析中国及邻区 400 km 高度处 7 个地磁分量(ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 、 ΔH 、 ΔF 、 ΔD 和 ΔI)的卫星磁异常及其垂直梯度的分布特点,讨论截止阶数对磁异常分布的影响,并与 MAGSAT 卫星磁异常分布进行对比分析. 对卫星磁异常与岩石圈构造的关系进行初步探讨.

2 计算方法

2.1 岩石圈磁场的能谱

为了解地磁场高阶球谐级数的变化特点,我们首先给出岩石圈磁场的能谱. 根据 Lowes-Mauersberger 能谱计算方法^[21],地磁场能谱的表达式为

$$W(n) = (n+1) \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2],$$

式中 g_n^m 、 h_n^m 是 n 阶 m 次球谐系数. 图 1 绘出 POMME-4.2S 模型岩石圈磁场($n \geq 16$)部分的能谱随谐波阶次的变化.

从图 1 可以看出,岩石圈磁场的能谱并非随阶次增加而线性变化,而是在扰动变化的同时有增加、平稳和减小的变化趋势. 变化趋势可以分为 3 个主要阶段:16~90 阶缓慢增加;91~220 阶基本稳定,

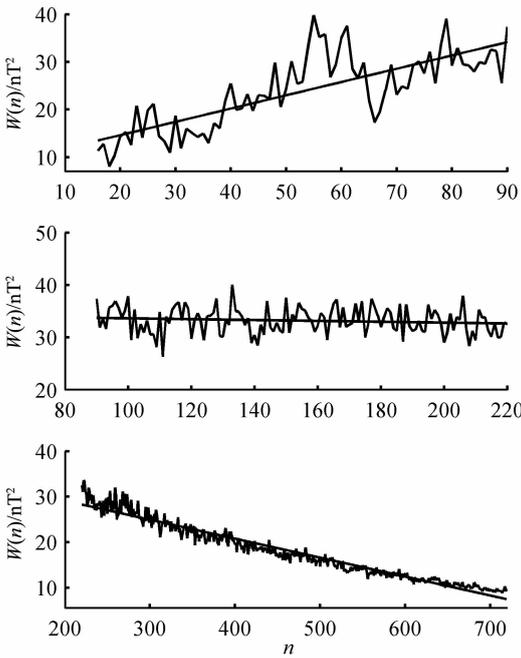


图 1 POMME-4. 2S 模型岩石圈磁场能谱随谐波阶次的变化
Fig. 1 The changes of power spectra of lithospheric magnetic field with the spherical harmonic orders for POMME-4. 2S model

$$\Delta X = \sum_{n=16}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda] \frac{\partial P_n^m(\cos\theta)}{\partial \theta}, \quad (2)$$

$$\Delta Y = \sum_{n=16}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n \frac{m}{\sin\theta} [g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda] P_n^m(\cos\theta), \quad (3)$$

$$\Delta Z = - \sum_{n=16}^N (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda] P_n^m(\cos\theta). \quad (4)$$

对于岩石圈磁场水平分量 ΔH 、总强度 ΔF 、磁偏角 ΔD 和磁倾角 ΔI 的计算,根据地磁场各要素之间的关系式: $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$, $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$, $D = \arctan(Y/X)$, $I = \arctan(Z/H)$, 首先分别计算出各个分量的总磁场 ($n=1 \sim 720$) 和地核场 ($n=1 \sim 15$), 然后用各个分量的总磁场减去地核场, 剩余部分即为各个分量的岩石圈磁场。

垂直梯度的计算是将各个磁场分量分别对地心距 r 求导数^[24], 即可得到各个分量垂直梯度的计算表达式, 表示磁场沿地球半径方向移动单位距离 (例如 1 km) 的变化值。

本文计算的经度和纬度范围分别是 $70^\circ\text{E} \sim 140^\circ\text{E}$ 和 $15^\circ\text{N} \sim 55^\circ\text{N}$, 计算网格点为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 空间高度为地表以上 400 km。

3 卫星磁异常的分布特征

根据上述计算方法, 图 2 绘出 POMME-4. 2S

平均值为 32.7 nT^2 ; $221 \sim 720$ 阶逐渐减小, 能谱随谐波阶次的变化仍然是扰动变化, 但扰动幅度随阶次增加越来越小。

2.2 岩石圈磁场计算方法

根据地磁场位函数理论, 地球内源磁场的磁位的球谐级数可以表达为

$$U(r, \theta, \lambda, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \times (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos\theta), \quad (1)$$

式中 λ 和 θ 分别为经度和余纬, a 为地球平均半径, $P_n^m(\cos\theta)$ 是 n 阶 m 次 Schmidt 准归一化缔合 Legendre 函数. 在球坐标系下, 对位函数求导可得到地磁场 3 个直角坐标分量 ($X = \partial U / r \partial \theta$, $Y = -\partial U / r \sin\theta \partial \lambda$, $Z = \partial U / \partial r$), 取球谐阶次 $n \geq 16$, 可直接计算岩石圈磁场北向分量 ΔX 、东向分量 ΔY 和垂直分量 ΔZ , 其表达式为^[22, 23]

模型 $N=720$ 阶时中国及邻区 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 、 ΔH 、 ΔF 、 ΔD 和 ΔI 7 个分量和 $N=65$ 阶 ΔF 分量 (图 2 右下角) 的卫星磁异常分布图. 图中磁异常强度分量的单位为 nT, 磁偏角和磁倾角的单位为 $^\circ$. 从图 2 可以看出, 各个分量的磁异常分布的形态相对简单, 正磁异常和负磁异常成片分布, 分布并非均匀, 在局部地区形成磁异常中心, 表 1 列出 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 和 ΔD 主要磁异常中心的位置和强度。

3.1 磁异常分布的形态特点

仔细对比图 2 中 7 个分量的磁异常分布, 可以看出 7 个分量的异常分布并非各自独立. 磁异常分布的形态、等值线的走向和异常中心点的位置分布规律相近的分量分别是: ΔX 和 ΔH , ΔY 和 ΔD , ΔZ 和 ΔF . ΔI 的分布形态与 ΔZ 和 ΔF 的分布也非常接近. 因此, 我们将按 3 种分布类型对磁异常进行分析, 重点分析 ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 3 个分量的磁异常分布特点。

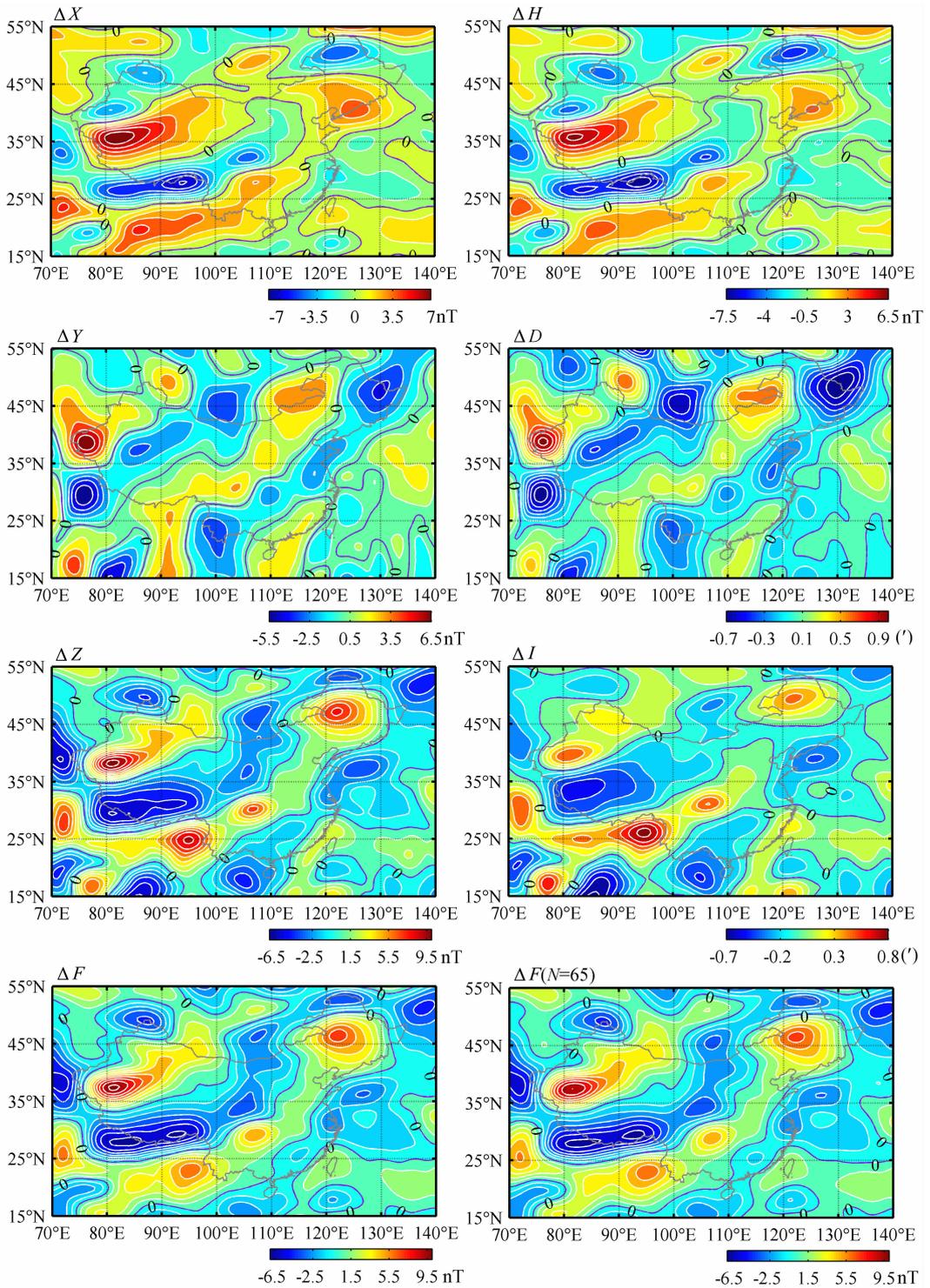


图 2 中国及邻区磁异常分布图(除右下角图为 $N=65$ 阶外,其余的图为 $N=720$ 阶)

Fig. 2 Distribution of the satellite magnetic anomalies in China and adjacent areas (Besides the figure in the bottom right corner is $N=65$, the rest of figures are $N=720$)

(1) ΔZ 和 ΔF 磁异常

ΔZ 和 ΔF 分量的磁异常分布形态基本相同,根据地磁场 3 个坐标分量与总强度之间的关系可知,这种相关性表明,在 ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 3 个分量中, ΔZ 分量的贡献比 ΔX 和 ΔY 大。

从地理位置看, ΔZ 分量磁异常主要沿北东方向形成正负相间的异常条带,正异常和负异常条带各 2 个。正磁异常分布最长的条带北起松辽盆地,经华北地台、四川盆地、再往南西方向的云南滇西地区,一直延伸到缅甸和印度北部,并在四川盆地、松

辽盆地、印度北部(中心在印缅边界霍马林)形成正磁异常中心(表 1)。另一条正磁异常带从塔里木盆地沿北东方向延伸到俄罗斯伊尔库茨克,并在塔里木盆地形成最强的磁异常区,中心最大强度值为 9.5 nT。在两个正磁异常带之间的地区为负磁异常

区,北起黑龙江省北部的漠河地区,经过蒙古国东部、内蒙古(阿拉善和鄂尔多斯),呈北东走向,往南转为近东西走向,到青藏高原后,形成非常强的负磁异常。另一个负磁异常带主要分布在我国东南沿海,强度相对较弱。

表 1 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 和 ΔD 主要异常中心位置和强度($N=720$)

Table 1 The location and intensity of the main magnetic anomaly centers of ΔX 、 ΔY 、 ΔZ and ΔD ($N=720$)

异常名称	ΔZ			ΔX			ΔY			ΔD
	$\lambda/(^{\circ}\text{E})$	$\varphi/(^{\circ}\text{N})$	强度/nT	$\lambda/(^{\circ}\text{E})$	$\varphi/(^{\circ}\text{N})$	强度/nT	$\lambda/(^{\circ}\text{E})$	$\varphi/(^{\circ}\text{N})$	强度/nT	强度/($^{\circ}$)
塔里木盆地	81.0	38.1	9.5	81.0	40.6	-4.0	85.9	37.4	-2.7	-0.41
				82.0	35.8	6.7	76.4	38.6	6.2	0.93
松辽盆地	122.1	47.3	7.3	122.5	50.6	-5.0	129.9	47.8	-3.7	-0.68
				125.3	40.2	3.5	118.0	47.4	3.3	0.56
四川盆地	106.8	30.2	6.4	106.1	32.3	-4.7	110.0	29.9	-2.1	-0.25
				107.2	27.9	3.0	103.7	30.7	2.7	0.33
青藏高原	81.0	29.4	-6.1	83.8	26.7	-5.7	75.7	29.5	-5.4	-0.68
				82.0	35.8	6.7	97.7	31.1	2.1	0.27
印缅边界	94.9	24.8	8.3	93.9	27.9	-7.1	99.5	23.9	-3.1	-0.34
				86.2	19.5	4.4	91.5	25.9	2.6	0.29

从图 2 可以清楚地看出,青藏高原负磁异常区强度大、分布广,磁异常的中心区域为东西向条带,从我国西藏当雄地区一直向西延伸至尼泊尔西部(喜马拉雅山以南地区)的拜塔迪附近,表 1 给出的青藏高原 ΔZ 负磁异常中心位于强异常带的西部。

除了表 1 所列 ΔZ 主要磁异常中心的位置和强度外,在我国的边缘地区, ΔZ 分量还有 3 个强度相对较弱的负磁异常中心,它们的中心位置的强度分别是:黑龙江漠河地区($123.6^{\circ}\text{E}, 53.4^{\circ}\text{N}$)为 -4.1 nT,新疆北部地区($86.9^{\circ}\text{E}, 37.1^{\circ}\text{N}$)为 -4.1 nT,东部沿海地区($126.4^{\circ}\text{E}, 37.1^{\circ}\text{N}$)为 -3.8 nT。

磁倾角 ΔI 的主要异常区等值线走向和分布形态与 ΔZ 相近,异常中心的位置与 ΔZ 相同。在 ΔZ 异常增大的地区, ΔI 也随之增大。在几个主要磁异常区的中心, ΔI 异常值分别为:塔里木盆地 $0.51'$,松辽盆地 $0.43'$,四川盆地 $0.51'$,印缅边界 $0.74'$,青藏高原 $-0.45'$ 。

(2) ΔY 和 ΔD 磁异常

ΔY 和 ΔD 分量的磁异常分布形态和等值线走向基本相同,以东北向为主,磁异常条带状分布清晰,每个磁异常条带上都有几个异常中心。 ΔY 和 ΔD 的异常中心位置几乎一致,最大误差不超过 $0.8'$,因此,表 1 中只列出 ΔD 异常中心的偏角值,不再给出经度和纬度值。由表 1 可知, ΔY 磁异常增加(正

值区), ΔD 为正值,磁异常向东偏; ΔY 磁异常减小(负值区), ΔD 为负值,磁异常向西偏。

(3) ΔX 和 ΔH 异常

ΔX 和 ΔH 分量的分布形态、主要磁异常区的中心位置相近,表明 ΔX 的贡献比 ΔY 大。从表 1 也可清楚地看出, ΔX 磁异常中心的强度值明显大于 ΔY 的值。零等值线的走向以东西方向为主,在正、负磁异常最强的塔里木盆地和青藏高原地区,等值线走向为东西方向。

(4) ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 磁异常中心位置的关系

从图 2 可以看出,在同一个磁异常区, ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 磁异常中心的位置存在明显的规律。 ΔZ 异常中心的南北两边出现 ΔX 的异常中心,东西两边出现 ΔY 的异常中心。如果 ΔZ 为正异常, ΔX 在其北面为负异常、南边为正异常, ΔY 在其东边为负异常、西边为正异常,反之亦然。因此,在表 1 中给出每一个 ΔZ 异常中心的位置,对应给出 ΔX 和 ΔY 的两个异常中心位置。卫星磁异常 ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 异常中心位置的这种分布特点,在主磁场的非偶极子磁场中,3 个直角坐标分量异常中心的位置也存在^[23]。它们之间的主要区别是异常中心的位置不同,非偶极子磁异常的空间尺度比岩石圈磁异常大得多。这种场源性质不同,而磁场分布的表现形式相同,其中的物理内涵值得深入研究。

3.2 磁异常垂直梯度的分布特点

垂直梯度分布与磁异常的分布类似,7个地磁要素磁异常的垂直梯度的分布形态并不是完全独立.因此,图3只给出 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 和 ΔF 4个分量的垂直梯度分布图.从图3可以看出,400 km高度的垂直梯度值很小,即使垂直梯度最大的塔里木盆地, $\partial(\Delta F)/\partial r$ 的中心强度也只有0.05 nT/km.对比图2和图3还可以看出,磁异常及其垂直梯度的分布形态并不完全相同,主要差别是磁异常的零等值线和垂直梯度的零等值线所围区域有明显的差别,磁异常弱的地区差别更大.但是,垂直梯度的走向与磁异常走向仍然相近,条带状分布的特点明显.在塔里木盆地、松辽平原、四川盆地和青藏高原几个强磁异常区,磁异常及其垂直梯度几乎同步变化,磁异常强度较大的地区垂直梯度也大,垂直梯度异常

的中心位置与磁异常的中心位置几乎相同.

3.3 CHAMP 卫星磁异常与 MAGSAT 卫星磁异常的对比

安振昌等人利用MAGSAT卫星资料,采用球冠谐和分析方法给出了中国地区 ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 3个分量的磁异常分布图(见文献[9]图1~图3).塔里木盆地、四川盆地和松辽盆地正磁异常、青藏高原负磁异常在MAGSAT卫星磁异常图中已显示出来,但是与CHAMP卫星磁异常(图2)相比,磁异常区的范围、走向等存在很多差别.例如,在四川盆地, ΔZ 分量正磁异常的中心区域,MAGSAT卫星磁异常为北东向椭圆状分布,而CHAMP卫星磁异常是近圆形分布(图2);松辽盆地 ΔZ 正磁异常中心的南北两边,MAGSAT卫星磁异常的 ΔX 分量并没有显示出正磁异常和负磁异常中心.

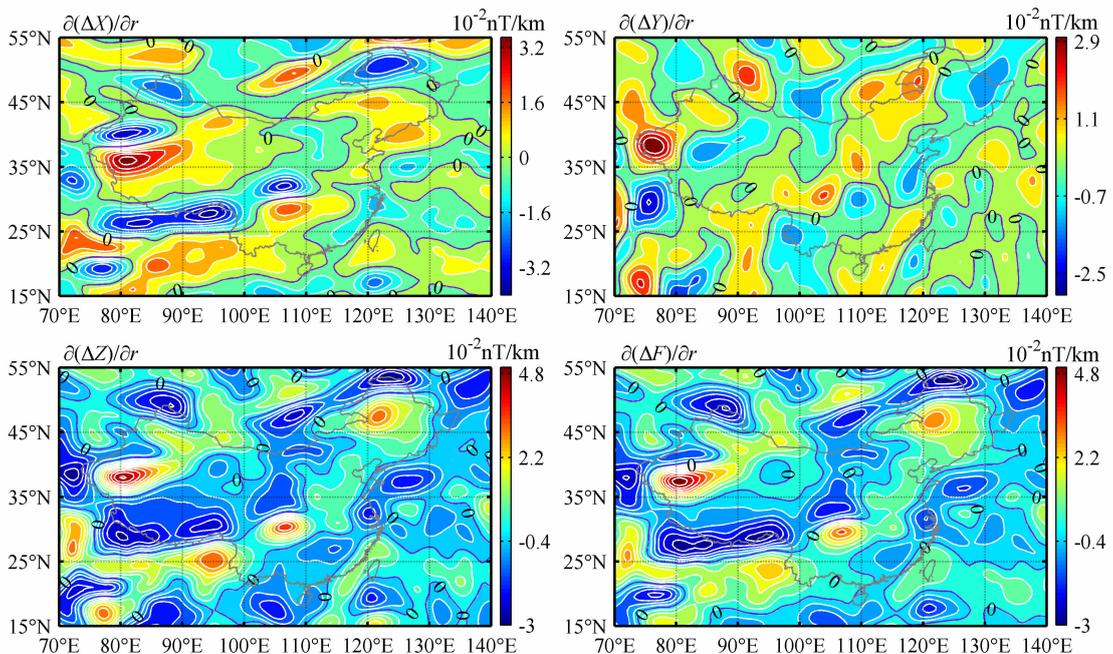


图3 卫星磁异常的垂直梯度分布

Fig. 3 Distribution of vertical gradient of satellite magnetic anomalies

由于MAGSAT卫星是椭圆轨道,运行只有半年(1979年11月~1980年5月),可用的磁测数据有限,由此得出的磁异常分布还不够细.相比之下,CHAMP卫星磁场模型POMME-4.2S不仅可以同时计算出7个分量的磁异常分布,而且由于截止阶数高,表示的最短空间波长小,给出的磁异常分布更为精细.

3.4 截止阶数对磁异常的影响

不同卫星磁场模型的截止阶数 N 取值不同^[10~15],地磁场综合模型CM系列 $N=65$ 阶^[13,14],

岩石圈磁场模型MF1~MF6系列的 $N=80\sim 120$ 阶^[15].为了定量分析截止阶数对磁异常的影响,我们计算了POMME-4.2S模型 $N=65$ 阶和90阶各个分量的磁异常分布,表2列出 $N=65$ 阶和90阶 ΔZ 分量在塔里木盆地等5个强磁异常区的中心位置和强度.比较表1和表2中 ΔZ 分量的磁异常中心位置和强度, $N=65$ 阶和720阶的磁异常中心经纬度误差小于 0.4° ,强度小于 0.8 nT; $N=90$ 阶和720阶的磁异常中心的经纬度误差小于 0.2° ,强度小于 0.4 nT.

表 2 $N=65, 90$ 阶 ΔZ 分量主要磁异常中心的位置和强度Table 2 The location and intensity of the main magnetic anomaly centers of ΔZ for the spherical harmonic orders $N=65$ and 90

异常名称	$N=65$			$N=90$		
	λ	φ	强度	λ	φ	强度
	/ $(^{\circ}\text{E})$	/ $(^{\circ}\text{N})$	/ nT	/ $(^{\circ}\text{E})$	/ $(^{\circ}\text{N})$	/ nT
塔里木盆地	81.3	38.4	8.9	81.0	38.1	9.4
松辽盆地	122.1	47.3	7.0	122.3	47.3	7.2
四川盆地	106.9	30.0	5.7	106.8	30.2	6.1
青藏高原	81.3	29.5	-6.0	81.0	29.4	-6.1
印缅边界	95.0	24.7	8.2	94.9	24.8	8.2

比较 ΔF 分量 $N=65$ 阶和 $N=720$ 阶的磁异常分布图(图 2 最下面两幅)可以看出,强磁异常区的分布基本相同,局部弱磁异常区的分布有一定差异.例如, $N=720$ 阶的磁异常在塔里木盆地西北边的负磁异常连成一片区,而 $N=65$ 阶的负磁异常并没有形成一个区片.但是, $N=90$ 阶与 $N=720$ 阶的磁异常分布形态一致,很难区分.这就说明 400 km 高度的磁异常分布的基本格局在 $N=90$ 时已确定,更高阶的球谐项只是对磁异常分布作微小调整.需要指出的是,这一结果不能下推到地球表面.在地表,由于浅层磁性物质的影响,磁异常信息丰富,不同的截止阶数对磁异常的影响很大.根据球谐阶次与空间波长的关系, $N=90$ 阶对应的空间波长为 445 km,表明 400 km 高度的卫星磁异常主要由中波长磁场

产生,反映的是大尺度的岩石圈构造特征.

3.5 磁异常分布与岩石圈构造关系的讨论

中国大陆的区域构造极其复杂,仅岩石圈构造单元的划分就提出了多种学术观点^[25~29].相比之下,400 km 高度的卫星磁异常分布相对简单.磁异常分布与地形变化、活动断裂带分布并没有直接的对应关系.例如,在青藏高原东南部的川滇地区,地形走向和活动断层主要为南北走向^[25],而各个分量的磁异常分布并没这一特征.进一步说明卫星磁异常反映的是大尺度的基底构造特征.因此,我们着重讨论主要磁异常区与大尺度区域构造的对应关系.

首先,磁异常与中国大陆块体构造年代的关系.对比 ΔZ 和 ΔF 磁异常分布与中国大陆块体基底构造可以看出^[26],古老的地台和巨型盆地是正磁异常区,其中,具有前寒武纪基底的塔里木盆地和松辽盆地以及太古代变质基底的四川盆地显示强正磁异常;而造山带(褶皱带和隆起地区)是负磁性区,在青藏高原负磁异常区中,喜马拉雅造山带是强度最大的负磁异常带.

其次,磁异常与岩石圈层状构造的关系.国内外地质和地球物理学者利用地震波、重力异常、地热场和航磁等资料,采用不同的地球物理反演方法,给出了中国大陆地区岩石圈岩石层状构造和基底厚度的参数^[27~37].表 3 列出主要磁异常区中国大陆块体的平均层状构造参数.我们从地壳、岩石圈的几何厚度和磁性层厚度两方面进行讨论.

表 3 主要磁异常区的岩石圈层状数据

Table 3 Layered data of the lithosphere in the main magnetic anomalies

主要磁异常区	磁性构造层 顶面深度 /km ^[31]	磁性构造层 底面深度 /km ^[31]	居里等温 面深度 /km ^[32~36]	平均热流值 /(mW · m ⁻²) ^[37]	热岩石圈 厚度/km ^[37]	莫霍面深度 /km ^[27,28]	岩石圈厚度 /km ^[29]
塔里木盆地	6~12	40~50	32~51	70	264	50~55	100~120
松辽盆地	4~8	36~40	19~40	44	71	32~34	70~90
四川盆地	4~10	40~50	19~29	53	182	40~46	80~100
青藏高原	0~6	28~34	20~23	>70	130~175	70~78	100~200

(1) ΔZ 磁异常与地壳和岩石圈厚度的关系

反映壳幔分界的莫霍面深度的确定主要用重力布格异常和地震波反演得出,相比之下,地震波反演比重力反演精确,表 3 列出莫霍面深度和岩石圈厚度是用地震测深给出的平均深度^[27~29].

从表 3 可以看出,青藏高原是莫霍面深度和岩石圈厚度最大的地区,岩石圈平均厚度为 140 km,莫霍面平均深度 70 km,磁异常为负值.而塔里木盆地的莫霍面深度和岩石圈厚度仅次于青藏高原,却

显示出最强的正磁异常区.因此,莫霍面深度和岩石圈厚度与磁异常并没有直接对应规律,仅从它们的厚度并不能判断磁异常的强弱. Wasilewski 提出的莫霍面是一个磁性界面的观点在此并不相符^[30].此外,从表 3 中还可以看出,地热场方法给出的热岩石圈厚度是塔里木盆地最大^[37],显示正磁异常,但青藏高原的热岩石圈厚度也较大,却显示负磁异常,进一步说明岩石圈厚度与磁异常没有直接关系.地壳和岩石圈的厚薄并不是卫星磁异常的真正原因.

(2) ΔZ 磁异常与磁性层厚度的关系

根据航磁异常,可以反演得出岩石圈磁性层厚度和居里等温面深度.由于磁性层厚度和居里等温面是随地点变化的,因此,表3给出的是变化范围.从表3可以看出,磁性层厚的地方出现正异常,塔里木盆地、四川盆地和松辽盆地的磁性层较厚,显示强正磁异常.青藏高原的磁性层较薄,显示为负磁异常.

居里等温面是岩石中磁性矿物因温度达到居里点而失去铁磁性的温度界面,它的深度通常用航磁异常计算.从表3中可以看出,卫星磁异常区的居里等温面深度是塔里木盆地最深,磁性层较厚,其磁异常强度大,且为正异常.而青藏高原由于热流值最大(平均值大于 $70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)^[37],居里等温面深度相对最浅,磁性层较薄,因而显示负磁异常.表明磁性层的厚度和居里面深度成正变关系,是卫星磁异常的重要原因.

4 结 论

(1)利用 POMME-4.2S 模型清晰地给出中国及邻区 400 km 高度 7 个地磁分量的卫星磁异常分布.7 个分量的卫星磁异常分布形态并非完全独立,分布图像只有 3 组是相对独立的.各个分量的正磁异常和负磁异常分布形成几个异常带,每个异常带有一个或多个磁异常中心,最大的正磁异常区在塔里木盆地、四川盆地和松辽盆地,最强的负磁异常区是青藏高原.在主要磁异常区, ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 的异常中心位置存在明显的相互关系: ΔZ 异常焦点的南北两边出现 ΔX 的异常中心,东西两边出现 ΔY 的异常中心.

(2)岩石圈磁场能谱随谐波阶次增加在扰动变化的同时,具有增大(16~90 阶)、平稳(91~220 阶)和减小(221~720 阶)3 个阶段的变化趋势.球谐模型截止 90 阶时,磁异常展布的空间形态已经确定,随着阶数的增加,磁异常焦点的位置和强度只有微小调整.400 km 高度的卫星磁异常主要由中长波长产生,反映的是大尺度的基底构造特征.磁异常强的地区垂直梯度也大,垂直梯度异常的中心位置与磁异常的中心位置几乎相同.

(3)在中国大陆 ΔZ 和 ΔF 磁异常分布中,古老的地台和巨型盆地是正磁异常区,其中,塔里木盆地、四川盆地和松辽盆地 3 个巨型盆地显示强的正磁异常;而造山带和隆起地区是负磁异常区,青藏高原负磁异常强度大,喜马拉雅造山带是强度最大的

东西向负磁异常带.卫星磁异常与地形变化、断裂带分布、莫霍面深度和岩石圈厚度没有直接的对应关系,而与居里等温面深度、磁性层厚度有明显的正变关系.

参考文献(References)

- [1] Arkani-Hamed J, Zhao S K, Strangway D W. Geophysical interpretation of the magnetic anomalies of China derived from MAGSAT data. *Geophys. J.*, 1988, **95**: 347~359
- [2] 徐文耀. 地磁场的三维巡测和综合建模. 地球物理学进展, 2007, **22**(4):1035~1039
Xu W Y. Three-dimensional survey and comprehensive modeling of geomagnetic field. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(4):1035~1039
- [3] 徐文耀,白春华,康国发. 地壳磁异常的全球模型. 地球物理学进展, 2008, **23**(3):641~651
Xu W Y, Bai C H, Kang G F. Global models of the Earth's crust magnetic anomalies. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(3):641~651
- [4] Purucker M E, Langel R A, Rajaram M, Raymond C. Global magnetization models with a priori information. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:2563~2584
- [5] Lesur V, Maus S. A global lithospheric magnetic field model with reduced noise level in the Polar Regions. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L13304, doi:10.1029/2006GL025826
- [6] 张昌达. 由卫星和航空磁测成果推断中国岩石圈的磁性特征. 地球物理学进展, 2003, **18**(1): 103~110
Zhang C D. Deduction of magnetic characteristics of lithosphere in China from results on satellite and aeromagnetic measurements. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2003, **18**(1):103~110
- [7] 高金田,安振昌,顾左文等. 地磁正常场的选取与地磁异常场的计算. 地球物理学报, 2005, **48**(1):56~62
Gao J T, An Z C, Gu Z W, et al. Selection of the geomagnetic normal field and calculation of the geomagnetic anomalous field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(1):56~62
- [8] 安振昌. 1950~1990 年中国地磁剩余场冠谱分析. 地球物理学报, 2003, **46**(6):767~771
An Z C. Spherical cap harmonic analysis of the geomagnetic residual field in China for 1950~1990. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(6):767~771
- [9] 安振昌,马石庄,谭东海. 中国及邻近地区卫星磁异常的球冠谱和分析. 地球物理学报, 1992, **35**(增刊): 188~197
An Z C, Ma S Z, Tan D H. Spherical cap harmonic analysis of satellite magnetic anomaly in Chinese and adjacent region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1992, **35**(Suppl.):188~197
- [10] Olsen N, Holme R, Hulot G, et al. Ørsted initial field model. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(22):3607~3610
- [11] Maus S, Rother M, Stolle C, et al. Third generation of the Potsdam magnetic model of the Earth (POMME). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2006, **7**(7): Q07008, doi:10.1029/2006GC.001269
- [12] Sabaka T J, Olsen N, Langel R A. A comprehensive model of the quiet-time near Earth magnetic field: phase 3. *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. *Geophys. J. Int.*, 2004, **159**: 521~547
- [14] Olsen N, Lühr H, Sabaka T J, et al. CHAOS- a model of the Earth's magnetic field derived from CHAMP, Ørsted and SAC-C magnetic satellite data. *Geophys. J. Int.*, 2006, **166** (1):67~75
- [15] Maus S, Lühr H, Rother M, et al. Fifth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite measurements. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2007, **8**(6): Q05013, doi:10.1029/2006GC001521
- [16] Hamoudi M, Thébaud E, Lesur V, et al. Geoforschungs Zentrum anomaly magnetic map (GAMMA): a candidate model for the world digital magnetic anomaly map. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2007, **8**(6): Q06023, doi: 10.1029/2007GC001638
- [17] Maus S, Sazonova T, Hemant K, et al. National geophysical data centers candidate for the world digital magnetic anomaly map. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2007, **8**(6): Q06017, doi: 10.1029/2007GC001643
- [18] Purucker M E. Magnetic anomaly map of the world. *Eos Trans. AGU*, 2007, **88**(25):263
- [19] Hemant K, Thébaud E, Manda M, et al. Magnetic anomaly map of the world: merging satellite, airborne, marine and ground-based magnetic data sets. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, **260**:56~71
- [20] Hemant K, Maus M. Why no anomaly is visible over most of the continent-ocean boundary in the global crustal magnetic field. *Phys. Earth Planet. Int.*, 2005, **149**:321~333
- [21] 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
- [22] 康国发,高国明,白春华等. CHAMP 卫星主磁场长期变化和长期加速度的分布特征. *地球物理学报*, 2009, **52**(8):1976~1984
- Kang G F, Gao G M, Bai C H, et al. Characteristics of the secular variation and secular acceleration distributions of the main geomagnetic field for the CHAMP satellite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(8):1976~1984
- [23] 徐文耀. 地球电磁现象物理学. 合肥:中国科技大学出版社, 2009
- Xu W Y. Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009
- [24] 安振昌,王月华,徐元芳. 中国及邻近地区地磁场垂直梯度的计算与研究. *空间科学学报*, 1991, **11**(1):14~23
- An Z C, Wang Y H, Xu Y F. Calculations and analyses of vertical gradient of the geomagnetic field in China and adjacent areas. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 1991, **11**(1):14~23
- [25] 苏有锦,秦嘉政. 川滇地区强地震活动与区域新构造运动的关系. *中国地震*, 2001, **17**(1):24~34
- Su Y J, Qin J Z. Strong earthquake activity and relation to regional neotectonic movement in Sichuan-Yunnan region. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2001, **17**(1): 24~34
- [26] 袁学诚. 论中国大陆的基底构造. *地球物理学报*, 1995, **38** (4):448~459
- Yuan X C. On continental basal structure in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1995, **38**(4):448~459
- [27] 曾融生,孙为国,毛桐恩等. 中国大陆莫霍界面深度图. *地震学报*, 1995, **17**(3):322~327
- Zeng R S, Sun W G, Mao T E, et al. The depth of Moho in the mainland of China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1995, **17**(3):322~327
- [28] 滕吉文,曾融生,闫雅芬等. 东亚大陆及周边海域 Moho 界面深度分布和基本构造格局. *中国科学(D辑)*, 2002, **32**(2): 89~100
- Teng J W, Zeng R S, Yan Y F, et al. Depth distribution of Moho and tectonic framework in eastern Asian continent and its adjacent ocean areas. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2002, **32**(2):89~100
- [29] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元. *中国地质*, 2006, **33**(4): 700~710
- Li T D. Lithospheric tectonic units of China. *Geology in China* (in Chinese), 2006, **33**(4):700~710
- [30] Wasilewski P J, Mayhew M A. The Moho as a magnetic boundary revisited. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**(22): 2259~2262
- [31] 袁学诚. 中国地球物理图集. 北京:地质出版社, 1996
- Yuan X C. Atlas of Geophysics in China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1996
- [32] 李庆春,许炳如. 塔里木盆地居里等温面特征及其地质意义. *石油地球物理勘探*, 1999, **34**(5): 590~594
- Li Q C, Xu B R. The characteristic and geological meaning of Curie isothermic surface under the Tarim basin. *Oil Geophys. Prosp.* (in Chinese), 1999, **34**(5):590~594
- [33] 张先,虎喜凤,沈京秀等. 四川盆地及其西部边缘震区居里等温面的研究. *地震学报*, 1996, **18**(1):83~88
- Zhang X, Hu X F, Shen J X, et al. Study of Curie isothermal surface in Sichuan Basin and the seismic area on its western margin. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1996, **18**(1): 83~88
- [34] 张先,赵丽. 青藏高原航磁异常及居里面研究. *大地测量与地球动力学*, 2003, **23**(4):14~20
- Zhang X, Zhao L. Curie surface and aeromagnetic anomaly in Qinghai-Tibet plateau. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2003, **23**(4):14~20
- [35] 胡旭芝,徐鸣洁,谢晓安等. 中国东北地区航磁特征及居里面分析. *地球物理学报*, 2006, **49**(6):1674~1681
- Hu X Z, Xu M J, Xie X A, et al. A characteristic analysis of aeromagnetic anomalies and Curie point isotherms in Northeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(6):1674~1681
- [36] 徐元芳, Barraclough D R, Kerridge D J. 地壳磁化强度模型和居里等温面. *地球物理学报*, 1997, **40**(4):481~486
- Xu Y F, Barraclough D R, Kerridge D J. A crustal magnetization model and Curie isotherm. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(4):481~486
- [37] 汪洋,汪集隴,熊亮萍等. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征. *地球学报*, 2001, **22**(1):17~22
- Wang Y, Wang J Y, Xiong L P, et al. Lithospheric geothermics of major geotectonic units in China mainland. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2001, **22**(1):17~22