

文章编号:1001-1595(2009)05-0377-06

## 地球的正常密度

郝晓光, 胡小刚, 刘根友, 方 剑, 柳林涛

中国科学院 测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077

### The Distribution of the Earth's Normal Density

HAO Xiaoguang, HU Xiaogang, LIU Genyou, FANG Jian, LIU Lintao

Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

**Abstract:** In terms of level spheroid of the earth gravity and Maclaurin-Pizzetti spheroid, according to a series of viewpoints and contents of parameter spheroid, latitudinal density, quasi-isopotential condition, approximation level spheroid shown in authors' recent decade year researches, the concept of the earth's normal density is proposed to solve the Earth's normal density distribution for Earth's core spheroid-crust mantle spheroid layer (CS-CMSL) model.

**Key words:** parameter spheroid; latitudinal density; quasi-isopotential condition; approximation level spheroid; core spheroid-crust mantle spheroid layer (CS-CMSL)

**摘 要:** 从地球重力学的水准椭球和麦克劳林—皮蔡奇椭球出发, 根据作者近十几年研究发表的参数椭球、纬向密度、准等位条件、似水准椭球等一系列观点和内容, 提出“地球正常密度”概念, 并求解出“地核椭球—壳幔椭球层”模式的地球正常密度分布。

**关键词:** 参数椭球; 纬向密度; 准等位条件; 似水准椭球; 地核椭球—壳幔椭球层

中图分类号: P223

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(90814009, 40774011, 40874014, 40574033)

## 1 为什么要建立地球正常密度概念

本文的“地球正常密度”概念是相对于地球重力学研究地球密度问题而言的, 或者说, 是为了地球重力学研究地球密度问题而建立的。在地球重力学中, 有 3 个概念是大家都知道的, 即: “重力异常”、“正常重力”以及“密度异常”。从逻辑上说, “重力异常”概念是由“正常重力”概念定义的, 但“密度异常”这个概念却一直没有相应的“正常密度”概念来支撑。另外, “重力异常”概念与“密度异常”概念是相对应的, 但与“正常重力”概念相对应的“正常密度”概念却一直没有确定, 这就使得“地球的正常密度”在地球重力学中似乎是一个“缺失”的概念。著名地球物理学家布伦(K. E. Bullen)的《地球的密度》是一部重要的科学著作<sup>[1]</sup>, 它告诉人们地球的密度实际应“是怎样的”(实际分布), 而本文“地球的正常密度”则试图尝试一种新的思路去告诉人们地球的密度“理论应是怎样的”(理论分布)。

实际上, “地球正常密度”并不完全是新概念, 在地球重力学中, “地球正常重力”是水准椭球表

面的重力, 而“地球正常密度”则对应水准椭球内部的密度分布。著名地球重力学家莫里茨(H. Moritz)指出: “1980 大地参考系统采用等位椭球作为参照面, 因此很自然地会提出这样一个问题, 即这一椭球所相应的物质分布构形。类似地, 也要求研究地球物质分布的异常, 考虑重力场与地球内部的密度分布之间不可分割的联系”。“水准椭球内任何合理的物质分布是不知道的, 但水准椭球的非均匀、非平衡的物质分布是一定存在的”<sup>[2]</sup>。这就是说: “地球正常密度”目前是不知道的, 但“地球正常密度”是存在的。

## 2 有关地球正常密度的早期研究: 麦克劳林—皮蔡奇椭球

对于一般的旋转椭球来说, 匀质椭球表面的重力位不是常数。也就是说, 匀质椭球不是“等位椭球”。水准椭球表面的重力位是常数, 但其内部的密度却不是常数。这就是说, “等位椭球”不是匀质椭球。能够兼顾二者的是麦克劳林(C. MacLaurin)椭球。麦克劳林椭球是一种“匀质等位椭球”, 但麦克劳林椭球的匀质密度  $\rho_m$  不是任

意的,而是与椭球旋转的角速度 和长、短半轴  $a$ 、 $b$  构成以下的函数关系<sup>[3]</sup>

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{2 e^3}{G[(3+e^2)\arctan e - 3e]} \\ e^2 &= \frac{a^2 - b^2}{b^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

将地球的角速度 和长、短半轴  $a$ 、 $b$  代入上式,可算得麦克劳林椭球的质量为地球质量的 1.287 倍。麦克劳林求解出了匀质等位椭球,只是麦克劳林椭球的质量  $M_m$  要比地球的质量  $M$  大,  $M_m = 1.287 M$ 。1894 年,皮蔡奇 (P. Pizzetti) 用一层引力位为常数但密度为负数的单层椭球面包裹在麦克劳林椭球上,成功地将麦克劳林椭球比地球多的那部分质量抵消掉。这层“负质量”的面密度  $\mu$  是随纬度  $B$  变化的<sup>[2-3]</sup>。

$$\mu = \frac{M - M_m}{4 a^2 b} \sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B} \quad (2)$$

根据斯托克斯 (G. G. Stokes) 定理,计算水准椭球表面的正常重力时,其内部的密度分布是可以不知道的。然而,麦克劳林—皮蔡奇椭球表面的重力完全等于水准椭球表面的正常重力,但其密度分布是知道的。由于麦克劳林椭球是“匀质等位椭球”,而皮蔡奇的椭球质面的引力位是处处相等的,因此,麦克劳林—皮蔡奇椭球是一种“等位椭球”,是一种密度分布为已知函数的水准椭球。也就是说,麦克劳林—皮蔡奇椭球给出了一种密度分布函数,其内部是匀质的,而表面是一层“纬向分布”的“负密度”质面。显然,这种“正常密度”在数学上是成功的,但却不符合地球的实际情况。因为地球并不是由一个内椭球和一层外膜构成的,密度也不可能是负数。但是,麦克劳林—皮蔡奇椭球的“双层结构”给了我们有益的启示:内部是一个匀质椭球,外层密度则按“纬向分布”。

### 3 麦克劳林—皮蔡奇椭球的发展:双层结构的“参数椭球”

麦克劳林—皮蔡奇椭球的“双层结构”使我们想到要去建立一个“双层结构”的旋转椭球,而且,这个双层结构的外层不再是一个没有厚度的质面。

大家知道,球体的引力问题比较简单,但椭球的引力问题则比较复杂,牛顿 (I. Newton) 用了几个球体的比例方法,仅求出了匀质椭球表面上赤道与极点的引力的比例。后来,经过麦克劳林 (C. MacLaurin)、雅可比 (K. G. J. Jacobi)、拉格朗

日 (J. L. Lagrange)、拉普拉斯 (P. S. Laplace)、艾复来 (J. Ivory) 及恰勒 (M. Chasles) 等人的研究,才解决了匀质椭球的引力问题<sup>[4]</sup>。下面建立一个“双层结构分层匀质的”旋转椭球来发展这项研究。设两个大小相似的旋转椭球如图 1 所示。

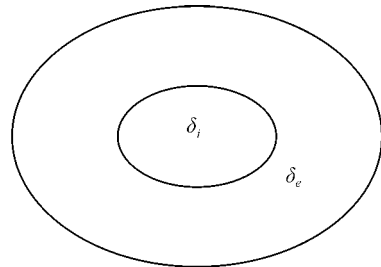


图 1 双层匀质椭球

Fig. 1 Twin-layer homogeneous spheroid

$a$ 、 $b$  为外椭球的长、短半轴;  $a_n$ 、 $b_n$  为内椭球的长、短半轴;  $a_n = na$ ,  $b_n = nb$ ,  $0 < n < 1$ ;  $n$  为调整界面的深度参数;  $\delta_i$  为内椭球的匀质密度;  $\delta_e$  为外椭球层的匀质密度;  $M$  为双层椭球的总质量。于是,双层旋转椭球外表面的重力公式为<sup>[5]</sup>

$$g = \frac{\sqrt{(P - \frac{2}{3}e^2)^2 a^4 \cos^2 B + Q^2 b^4 \sin^2 B}}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}} = \quad (3)$$

$$g(B, n, e)$$

$$P = 2 G \frac{1+e^2}{e^3} \left[ \frac{3M - 4 e a^2 b}{4 a^2 b n^3} \left[ \arctan \frac{nbe}{\sqrt{n^2 b^2 + c}} - \frac{nbe \sqrt{n^2 b^2 + c}}{n^2 b^2 (e^2 + 1) + c} \right] + e \left[ \arctan e - \frac{e}{1+e^2} \right] \right]$$

$$Q = 4 G \frac{1+e^2}{e^3} \left[ \frac{3M - 4 e a^2 b}{4 a^2 b n^3} \left[ \frac{nbe}{\sqrt{n^2 b^2 + c}} - \arctan \frac{nbe}{\sqrt{n^2 b^2 + c}} \right] + e \left[ e - \arctan e \right] \right]$$

$$c = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(n^2 a^2 + n^2 b^2 - e^2)^2 + 4 n^2 a^2 b^2 (1 - n^2)} - (n^2 a^2 + n^2 b^2 - e^2) \right]$$

式中,  $B$  为椭球外表面的纬度;  $r$  为向径。将式(3)与水准椭球表面重力的索米里安 (C. Somigliano) 公式进行比较便不难看出<sup>[4]</sup>,水准椭球的重力仅仅是纬度  $B$  的函数,而“双层椭球”的重力不仅是纬度  $B$  的函数,而且是界面深度参数  $n$  和外密度参数  $e$  的函数(由于双层椭球的总质量  $M$  是不变的,所以  $\delta_i$  可由  $n$  和  $e$  来计算确定)。由于式(3)含有深度参数  $n$  和密度参数  $e$ ,这样就可以用来研究椭球内部的密度和界面深度与椭球表面重力的关系,所以,将图 1 表示的“双

层匀质椭球”称为“参数椭球”<sup>[5]</sup>。

“参数椭球”的建立使我们有可能对麦克劳林—皮蔡奇椭球进行发展。麦克劳林—皮蔡奇椭球的缺点是内体太大而外层太薄,不符合地球的实际情况,而我们则可以利用公式(3)中的界面深度参数  $n$  的变化,将椭球内的密度界面确定在地球的核幔边界上。

### 4 一种近似的选择:参数椭球的“准等位条件”

麦克劳林—皮蔡奇椭球是一种“等位椭球”。所以,要将“参数椭球”也加上“等位条件”。但是,由于“参数椭球”的等位条件在数学上难以获得,这里只能给出一种近似的选择,即采用极点和赤道两点的等位条件,近似代替椭球表面的等位条件,并将其称之为参数椭球表面重力位的“准等位条件”。实际上,牛顿在研究匀质椭球的引力问题时也是从极点和赤道这两点入手的。设参数椭球表面的极点和赤道的重力位为  $U_P$  和  $U_E$ ,令  $U_P = U_E$ ,则“准等位”的条件方程为<sup>[6]</sup>

$$2(K_E - K_P) = P_E a^2 - Q_P b^2 - \omega^2 a^2 \quad (4)$$

式中,

$$P_E = 2 G \frac{1+e^2}{e^3 n^3} [(0 - e)(\arctan e_a - \frac{e_a}{1+e_a^2}) +$$

$$n^3 e(\arctan e - \frac{e}{1+e^2})]$$

$$Q_P = 4 G \frac{1+e^2}{e^3 n^3} [(0 - e)(e_b - \arctan e_b) +$$

$$n^3 e(e - \arctan e)]$$

$$K_E = 2 G \frac{a^2}{e n^3} [(0 - e)\arctan e_a + n^3 e \arctan e],$$

$$e_a = \frac{nbe}{\sqrt{n^2 b^2 + c_a}}$$

$$K_P = 2 G \frac{a^2}{e n^3} [(0 - e)\arctan e_b + n^3 e \arctan e],$$

$$e_b = \frac{nbe}{\sqrt{n^2 b^2 + c_b}}$$

$$c_a = \frac{1}{2} [ \sqrt{(n^2 a^2 + n^2 b^2 - a^2)^2 + 4n^2 a^2 b^2 (1 - n^2)} - (n^2 a^2 + n^2 b^2 - a^2) ]$$

$$c_b = \frac{1}{2} [ \sqrt{(n^2 a^2 + n^2 b^2 - b^2)^2 + 4n^2 a^2 b^2 (1 - n^2)} - (n^2 a^2 + n^2 b^2 - b^2) ]$$

$$E_b = e_b - \arctan e_b, E_a = \arctan e_a - \frac{e_a}{1+e_a^2}, \omega =$$

$\frac{3M}{4 a^2 b}$  为地球平均密度,

$$E = e - \arctan e, E = \arctan e - \frac{e}{1+e^2},$$
 于是,

由式(4)可得<sup>[6]</sup>

$$e = \frac{\omega [2(\arctan e_a - \arctan e_b) - \frac{E_a}{e^2} + \frac{2E_b}{e^2}] + \frac{2en^3}{2G}}{2(\arctan e_a - \arctan e_b) - \frac{E_a}{e^2} + \frac{2E_b}{e^2} + n^3 (\frac{E}{e^2} + \frac{2E}{e^2})} = e(n) \quad (5)$$

式中,  $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ ;  $M$  为地球质量;  $G$  为万有引力常数;  $\omega$  为地球自转角速度。

由式(5)可见,参数椭球的“准等位条件”将密度参数  $e$  和界面深度参数  $n$  联系在了一起,减少了参数选择的随意性。大家知道,水准椭球表面重力是纬度的函数,而且从极点到赤道基本上可近似为纬度的函数。所以,对于密度分布不同的椭球来说,满足椭球表面的“准等位条件”,基本上就能够近似满足椭球表面的等位条件。

### 5 准等位条件向等位条件趋近:参数椭球趋向麦克劳林椭球

由于参数椭球的总质量  $M$  是不变的,所以,  $i$  可由  $n$  和  $e$  来确定

$$in^3 + e(1 - n^3) = 0 \quad (6)$$

$$\text{令}, A(n) = \frac{n^3 - 1}{2(\arctan e_a - \arctan e_b) - \frac{E_a}{e^2} + \frac{2E_b}{e^2} + n^3 (\frac{E}{e^2} + \frac{2E}{e^2})},$$

则式(5)可改写为

$$i(n) = \frac{\omega}{n^3} + \frac{A(n)}{n^3} \{ \omega [2(\arctan e_a - \arctan e_b) - \frac{E_a}{e^2} + \frac{2E_b}{e^2}] + \frac{2en^3}{2G} \} \quad (7)$$

由参数椭球的定义(参见图 1)可知,当  $n \rightarrow 1$  时,椭球内的密度界面趋向参数椭球表面。如不附加约束条件,当  $n = 1$  时,参数椭球的内密度参数  $i$  退化成平均密度  $\rho_0$ ,参数椭球退化成匀质椭球。然而,若附加“准等位条件”,当  $n \rightarrow 1$  时,参数椭球的内密度  $i$  还会退化成平均密度  $\rho_0$  吗?当然不会!因为“准等位条件”是“等位条件”的近似,而当  $n \rightarrow 1$  时,“准等位条件”将无限趋近“等位条件”。由于麦克劳林椭球是“匀质等位椭球”,所以,附加“准等位条件”的参数椭球,当  $n \rightarrow 1$  时,其内密度  $i$  应该趋向麦克劳林椭球的密度  $\rho_m$ ,而不

是趋向匀质椭球的密度  $\rho_0$ 。事实也正是如此,笔者已从数学上严格地证明了这一过程<sup>[7]</sup>:

$$\rho_i(n-1) = \rho_0 + f \rho_0 \left( \frac{2E}{e^2} - \frac{E}{e^2} \right) + \frac{2e}{2G} J A(n-1)$$

$$A(n-1) = 3f \frac{2e^3}{1+e^2} \left( 1 - \frac{1}{e^2} + \frac{1}{e^2} \right) + 3 \left( \frac{E}{e^2} - \frac{2E}{e^2} \right) J^{-1}$$

所以,

$$\rho_i(n-1) = \frac{2e^3}{2Gf(3+e^2)\arctan e - 3eJ} = \rho_m \quad (8)$$

不难看出,式(8)与式(1)是完全相同的。这就表明,附加“准等位条件”的参数椭球,当  $n \rightarrow 1$  (外壳无限变薄)时,其内椭球趋向麦克劳林椭球。由于麦克劳林椭球是“等位椭球”,这就是说,当参数椭球的界面深度参数  $n \rightarrow 1$  时,“准等位条件”趋向“等位条件”,这也同时说明了“准等位条件”与“等位条件”的近似关系。

### 6 麦克劳林—皮蔡奇椭球的进一步发展:构建椭球的“纬向密度”函数

最早用于研究地球密度的地球重力学理论,是克莱劳(A. C. Clairaut)于 1743 年发表的平衡形状理论。勒让德(A. M. Legendre)和拉普拉斯(P. S. Laplace)于 1825 年根据这个理论得到了地球内部的密度定律。此后,达尔文(G. H. Darwin)、维歇特(E. Wiechert)、布拉德(E. C. Bullard)、布伦(K. E. Bullen)分别于 1884 年、1897 年、1945 年、1975 年得到了类似的密度定律。但是这些密度定律得到的都是地球的径向密度分布  $\rho = \rho(r)$ ,而没有得到地球的纬向密度分布  $\rho = \rho(B)$ 。

幸运的是,麦克劳林—皮蔡奇椭球是一种含有“纬向密度”分布的双层结构椭球:内部是一个匀质椭球,外层是按密度“纬向分布”的椭球质面。麦克劳林—皮蔡奇椭球的缺点是内体太大、外层太薄,不符合地球的实际情况,但可以借鉴它的优点、改正它的缺点,结合地球的实际情况,利用参数椭球界面深度参数  $n$  的变化,将椭球内的密度界面确定在地球的核幔边界上。这样,笔者提出的“双层椭球”的内部是一个匀质的“地核椭球”,外部则是“纬向密度”分布的地幔与地壳合在一起“壳幔椭球层”,构成“地核椭球—壳幔椭球层”的双层结构,参见图 2。

地球和地核的平均半径为 6 371 km 和 3 473 km,地壳平均厚度为 33 km,若将地壳并入地幔,则核

幔边界的深度参数  $n$  为

$$a(1-n) + b(1-n) = 2(6\,371 - 3\,473), \\ n = 0.544\,872$$

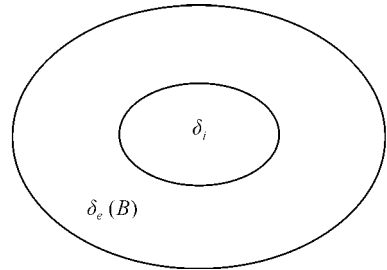


图 2 “地核椭球—壳幔椭球层”的双层结构

Fig. 2 Twin-layer structure of core spheroid-crust mantle spheroid layer

由杰弗里斯—布伦地球密度模型<sup>[8]</sup>,可算得地壳加地幔的平均密度为  $\rho_e = 4.658 \text{ g/cm}^3$ ,取地球的平均密度为  $\rho_0 = 5.517 \text{ g/cm}^3$ ,则由公式(6)可知“地核椭球”的匀质密度为

$$\rho_i = \frac{1}{n^3} (\rho_0 - \rho_e) + \rho_e = 9.968 \text{ g/cm}^3$$

这样,图 2“地核椭球—壳幔椭球层”的两个参数就确定了,核幔边界的界面深度参数为  $n = 0.544\,872$ ,“地核椭球”的匀质密度为  $\rho_i = 9.968 \text{ g/cm}^3$ 。下面按照皮蔡奇椭球面的纬向密度函数  $\mu(B)$  的形式来构建“壳幔椭球层”的纬向密度函数  $\rho_e(B)$ 。

忽略皮蔡奇椭球面密度的负号,公式(2)可变化为

$$\mu(B) = \frac{M - M_m}{4a^2b} \sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B} = \sqrt{\mu_E^2 \cos^2 B + \mu_P^2 \sin^2 B}$$

式中,  $\mu_E$  为皮蔡奇椭球面赤道点的密度值;  $\mu_P$  为皮蔡奇椭球面极点的密度值。于是,按照  $\mu(B)$  的函数结构,“壳幔椭球层”纬向密度函数形式可类似地表达为

$$\rho_e(B) = \sqrt{\rho_{eE}^2 \cos^2 B + \rho_{eP}^2 \sin^2 B} \quad (9)$$

式中,  $\rho_{eE}$  为“壳幔椭球层”赤道处的密度值;  $\rho_{eP}$  为“壳幔椭球层”极点处的密度值。

不难看出,式(9)中的  $\rho_{eE}$  和  $\rho_{eP}$  为两个待定常数,只要求出这两个待定常数,就得到了“壳幔椭球层”纬向密度函数  $\rho_e(B)$ 。两个待定常数需要两个方程来求解,正好应用椭球极点和赤道点的“准等位条件”方程来联立求解。

采用水准椭球的极点重力与匀质地核椭球在

极点的引力的差值为约束条件,则“壳幔椭球层”的“极点重力纬向密度积分公式”为<sup>[9-10]</sup>

$$P - v_{iP} = G \int_0^d \frac{\rho \cos \theta}{r^3} d \quad (10)$$

采用水准椭球的赤道重力与匀质地核椭球在赤道的引力的差值为约束条件,则“壳幔椭球层”的“赤道重力纬向密度积分公式”为

$$E + a^2 - v_{iE} = G \int_0^d \frac{\rho \cos \theta}{r^3} d \quad (11)$$

式中,  $P$  和  $E$  是 1980 大地参考系统水准椭球极点和赤道点的正常重力值;  $v_{iE}$  与  $v_{iP}$  为匀质“地核椭球”在“壳幔椭球层”外表面赤道点与极点处的引力值。联立方程(10)和方程(11)求解  $\rho_E$  和  $\rho_P$  的过程比较复杂,在此只列出结果,具体步骤请参阅文献[9-10, 12]。

$$\rho(B) = \sqrt{4.650852^2 \cos^2 B + 4.666229^2 \sin^2 B} \quad (12)$$

这样,就获得了“准等位条件”下的“地核椭球—壳幔椭球层”的正常密度分布方式。将麦克劳林—皮蔡奇椭球与“地核椭球—壳幔椭球层”相比,有以下相同与不同点:

1. 麦克劳林—皮蔡奇椭球与“地核椭球—壳幔椭球层”,二者均为“双层结构”,都是内部为匀质椭球,外部为“纬向密度”分布。
2. 麦克劳林—皮蔡奇椭球的内椭球太大、外层太薄,且为负密度,不符合地球的实际情况;“地核椭球—壳幔椭球层”按照地核与壳幔混合体分为两层,密度界面设在核幔边界处,内、外密度参考“杰弗里斯—布伦地球密度模型”取值求解,比较接近地球的实际情况<sup>[8]</sup>。
3. 麦克劳林—皮蔡奇椭球的表面满足“等位条件”,而“地核椭球—壳幔椭球层”的表面仅仅满足极点和赤道的“准等位条件”,所以,麦克劳林—皮蔡奇椭球是一种水准椭球,而“地核椭球—壳幔椭球层”则是一种与水准椭球接近的“似水准椭球”<sup>[11]</sup>。

### 7 非惟一性与惟一性:“似水准椭球”的密度分布与地球的正常密度

“地核椭球—壳幔椭球层”是一种与水准椭球接近的“似水准椭球”,由式(5)可知,“准等位条件”将密度参数  $\rho$  和界面深度参数  $n$  联系在了一起,使式(3)中的两个自由参数变成了一个自由参数,削弱了“似水准椭球”密度分布方式的非惟一

性。然而,削弱“非惟一性”并不等于能消灭“非惟一性”。对于水准椭球(“似水准椭球”也是一样)来说,同一种表面重力可以对应不同种内部密度分布方式<sup>[12]</sup>。麦克劳林—皮蔡奇椭球表面的“负密度”函数的存在,就充分说明了这种“非惟一性”。

虽然水准椭球(包括“似水准椭球”)的密度分布是非惟一的,但是,这些非惟一的密度分布并不能都符合地球的实际情况(例如麦克劳林—皮蔡奇椭球)。因此,定义:与地球实际情况较符合的那种水准椭球(似水准椭球)的密度分布,为“地球正常密度”。

水准椭球(似水准椭球)的密度分布是非惟一的,“地核椭球—壳幔椭球层”(参见图 2)的密度分布,是基本符合地球实际情况的、初步的和有待不断完善的一种“地球正常密度”:

$$n = 0.544872$$

$$i = 9.968$$

$$\rho(B) = \sqrt{4.650852^2 \cos^2 B + 4.666229^2 \sin^2 B}$$

值得注意的是,在求解“地核椭球—壳幔椭球层地球正常密度”时用到了“杰弗里斯—布伦地球密度模型”中的有关资料,将“杰弗里斯—布伦模型”与“地核椭球—壳幔椭球层模型”相比有以下几点不同:

1. 杰弗里斯—布伦模型是由地震学的方法得到的,主要用于地震学的研究,而地核椭球—壳幔椭球层模型是由地球重力学的方法得到的,主要用于地球重力学的研究。
2. 杰弗里斯—布伦模型分了几十层,适用于研究地球的内部结构,地核椭球—壳幔椭球层模型是“双层结构”,适用于研究地球的整体物质运动。
3. 杰弗里斯—布伦模型是球型结构,不考虑表面的“等位条件”,表面重力与地球正常重力相去甚远,忽略了地球的几何特征和重力特征,地核椭球—壳幔椭球层模型是椭球型结构,表面满足与“等位条件”近似的“准等位条件”,表面重力接近地球正常重力,满足了地球的几何特征和重力特征。

相对于麦克劳林—皮蔡奇椭球和杰弗里斯—布伦模型来说,地核椭球—壳幔椭球层模型吸取了麦克劳林—皮蔡奇椭球符合地球几何特征和重力特征的优点,也吸取了杰弗里斯—布伦模型符合地核和壳幔分层的优点。但是,地核椭球—壳

幔椭圆层模型毕竟是非常初步的。地核椭圆—壳幔椭圆层模型只有两层而不是多层,且表面只是满足“准等位条件”而不是“等位条件”,这些都有待在进一步的研究中不断发展。

“地球正常密度”概念的建立对认识和研究板块运动的动力问题有实际意义<sup>[13-14]</sup>。

## 参考文献:

- [1] BULLEN K E. The Earth's Density[M]. Beijing: Earthquake Press, 1982. (布伦 K E. 地球的密度[M]. 曹可珍, 宋炳忠, 译. 北京: 地震出版社, 1982.)
- [2] MORITZ H. The Figure of the Earth: Theoretical Geodesy and the Earth's Interior[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992. (莫里茨 H. 地球形状: 理论大地测量学和地球内部物理学[M]. 陈俊勇, 左传惠, 译. 北京: 测绘出版社, 1992.)
- [3] GUO Junyi. The Fundamental of Physical Geodesy[M]. Wuhan: Publishing House of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1994. (郭俊义. 物理大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994.)
- [4] FANG Jun. Gravimetry and Earth's Figures: II[M]. Beijing: Science Press, 1975. (方俊. 重力测量与地球形状学: 下册[M]. 北京: 科学出版社, 1975.)
- [5] HAO Xiaoguang. The Gravity of Parameter Ellipsoid[J]. Earth Science, 1997, 22(2): 223-226. (郝晓光. 参数椭圆表面的重力[J]. 地球科学, 1997, 22(2): 223-226.)
- [6] HAO Xiaoguang, LIU Dajie. Quasi Level Condition of Parameter Ellipsoid[J]. Journal of Tongji University: Nature Science, 2004, 32(1): 86-89. (郝晓光, 刘大杰. 参数椭圆的准等位条件[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 86-89.)
- [7] HAO Xiaoguang, XU Houze, LIU Dajie. A Preliminary Study of Mathematical Properties of the Parameter Ellipsoid[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 30(3): 203-207. (郝晓光, 许厚泽, 刘大杰. 参数椭圆数学性质的初步研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(3): 203-207.)
- [8] JEFFREYS H. The Earth: Its Origin History and Physical Constitution: Sixth Edition[M]. Beijing: Science Press, 1985. (杰弗里斯 H. 地球: 它的起源和物理结构[M]. 张焕志, 李致森, 译. 北京: 科学出版社, 1985.)
- [9] Hao Xiaoguang, Liu Genyou. Modification of Coefficient of the Earth Latitudinal Normal Density Function [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(2): 53-56. (郝晓光, 刘根友. 地球纬向正常密度函数系数的修正[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(2): 53-56.)
- [10] HAO Xiaoguang, LIU Genyou. Latitudinal Normal Density Function of Mantle [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(2): 105-109. (郝晓光, 刘根友. 地幔纬向正常密度函数[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 105-109.)
- [11] HAO Xiaoguang, LIU Genyou. Quasi Level Ellipsoid[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(3): 45-49. (郝晓光, 刘根友. 似水准椭圆[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 45-49.)
- [12] HAO Xiaoguang, LIU Genyou. Study on Density Distribution of Parameter Ellipsoid [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(2): 31-33. (郝晓光, 刘根友. 参数椭圆的密度分布研究[J]. 测绘科学, 2004, 29(2): 31-33.)
- [13] HAO Xiaoguang, FANG Jian, LIU Genyou. Comparison between Latitudinal Normal Density Hypothesis and Internal Wave Hypothesis[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(4): 991-996. (郝晓光, 方剑, 刘根友. 纬向正常密度假说与内波假说的比较[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 991-996.)
- [14] HAO Xiaoguang, FANG Jian, LIU Lintao, et al. Discussion on Latitudinal Normal Density Hypothesis and Internal Wave Hypothesis[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(1): 312-316. (郝晓光, 方剑, 柳林涛, 等. 再论纬向正常密度假说与内波假说的比较[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 312-316.)

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2008-10-20

修回日期: 2009-06-06

第一作者简介: 郝晓光(1958—), 男, 博士, 研究员, 从事地球重力学研究。E-mail: hxg@whigg.ac.cn

First author: HAO Xiaoguang (1958—), male, PhD, professor, majors in researches of Earth gravity.

E-mail: hxg@whigg.ac.cn