



论文

青藏高原大地水准面异常的解释与场源效应初探

张赤军^{①*}, 骆鸣津^②, 方剑^①, 周旭华^③, 柳林涛^①, 王新胜^①, 叶周润^①

① 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;

② 河南省地震局, 郑州 450003;

③ 中国科学院上海天文台, 上海 200030

* E-mail: iggzhangcj@sohu.com

收稿日期: 2010-08-11; 接受日期: 2011-04-07

国家自然科学基金(批准号: 90814009, 40874014, 41074050)资助

摘要 在正常地球椭球或球体的情况下, 其内外异常质量引起的大地水准面(异常)的表达式已推导出来, 从而可以决定该面是在正常地球之内, 抑或其外, 由此推得高原处的大地水准面应在其外(正值), 而青藏高原的大地水准面却在 -30 m 左右. 为什么会有这样大的负异常? 该大地水准面有什么特征? 它们由哪些场源组成的? 主要和其他的异常源的贡献有多大? 本文根据地震波速及地形、重力等资料对此作了较深入探讨和解释, 分析表明五个方面场源的总效应与 EGM-96 的结果相近.

关键词青藏高原
大地水准面异常
场源效应

大地水准面是接近于静止海平面的等位面, 由于地球表面的内部质量(密度)分布不均匀, 致使等位面的形状不规则, 它与地球的正常(参考)椭球面之差别称为大地水准面异常(起伏), 它和重力异常一样, 都是扰动位的派生物, 是地球重力场在地球表面的一个重要特征. 其重要性在于: 它是地面高程的基准面或起始面, 故为历代大地测量学者研究; 它表征着地球内部密度的总体分布, 因而它为研究和反演内部密度提供了必备的约束条件; 它也是工程、资源能源勘探中必不可少的基础数据; 此外用它还可以研究地球内部的物质对流及板块运动的机制, 还可用来研究海洋环流与海床的年龄, 因而受到地学和海洋工作者的关注. 由于它和扰动位(T)的派生物的数学表达式都与地球半径(R)倒数的方次有关, 唯有大地水准面的方次最低, 故反映着更为深(远)处的场源, 而其他的则反映浅(近)和更浅(近)处的场源, Bowin^[1]

认为地球深部物质不均匀引起的大地水准面(异常)约占 80%. 其他许多研究者也认为长波长大地水准面的场源在下地幔^[2~5], 并可利用扰动位的低阶项推求核幔起伏^[6]. 动力大地水准面理论工作者认为, 它主要反映了地幔对流引起的质量异常、核幔边界及地表地形起伏. 现今, 利用大地水准面资料研究青藏的壳幔结构及动力学问题的文献也有不少, 从不同侧面作了各有特色的研究^[7~10]. 在利用重力、地形、大地水准面、深地震折射与反射、地震层析和地热等资料, 人们对青藏及其他地区的地壳、地幔结构作了大量有益的研究^[11~16]. 值得注意的是, 在全球高原中, 大地水准面为负值的不少, 例如有东非、中西伯利亚、伊朗、蒙古、云贵、青藏高原等, 这些高原的共同特点是海拔高且出露于椭球之外的质量不小, 为什么它们的大地水准面反而为负呢? 为此本文以青藏高原为例, 对与此有关的问题作了讨论和回答, 其

中包括高原的正常大地水准面理论值、场源的具体分布及其量级等.

1 理想(正常)状态下青藏高原的大地水准面

在地球内外部质量引起的大地水准面(异常)的定性(即对其向径 dr 或 dN 值的正与负)分析中, 设旋转的地球椭球面上等于常数的重力位为正常重力位, 而使地球表面上的重力位偏离于上述常数的质量称为异常质量, 它所引起重力位的偏离称为扰动位, 因此含有异常质量地球的重力位等于正常地球重力位加上扰动位, 它们都是标量. 由于重力位是引力位和离心力位之和, 则含有异常质量的地球重力位中的离心力位与地球正常重力位中的离心力位相同, 这时的扰动位就是包含有异常质量的地球引力位减去地球正常引力位. 由于此处只是定性地论证扰动位与大地水准面(异常)的正与负, 则可以将旋转椭球视为静止的球体, 地球正常引力位即为地球正常重力位, 扰动位(T)则为包含异常质量的地球引力位与正常引力位之差.

1.1 球外异常(扰动)质量对球面上一点(p)引起的扰动位或大地水准面异常

设球形地球的总质量为 M , 其外的异常质量(用高为 h 的球帽代替)凝聚点为 m , 并设它们分别等效地集中于各自的质心上, 作上面的简化是为讨论的方便, 且不影响到问题(异常质量在球外或内)讨论的性质.

设 G 为引力常数, r 为(地)球面上的被研究点 p 到球心 o 距离, 则该点的正常引力位为

$$V(r) = -\frac{GM}{r}. \quad (1)$$

在图 1 中, 异常质量 m 对 p 点的扰动位 T , 有 $T=Gm/d$, d 为球面上 p 点到 m 点的距离, r_m 为点 m 到球心 o 的距离, ψ 为向径 r 与 r_m 的夹角(详见图 1 和图 2).

$$T(d) = \frac{Gm}{d} = T(r, \psi) = \frac{Gm}{r_m} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_m} \right)^n P_n(\cos \psi), \quad (2)$$

式中 $P_n(\cos \psi)$ 为勒德多项式, 则含有异常质量的地球引力位为

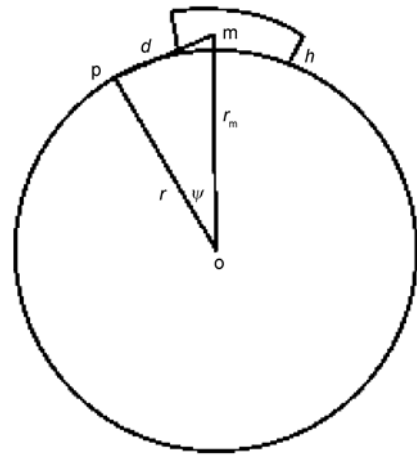


图 1 质量 m 在球外及其与球面点、球心的几何位置

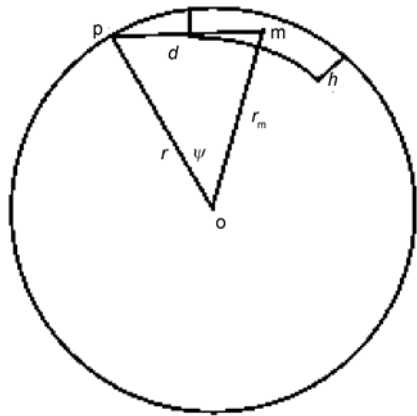


图 2 质量 m 在球内及其与球面点、球心的几何位置

$$\begin{aligned} V(r) + T(r, \psi) &= -\frac{GM}{r} + \frac{Gm}{d} \\ &= -\frac{GM}{r} + \frac{Gm}{r_m} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\left(\frac{r}{r_m} \right)^n P_n(\cos \psi) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

则含异常质量的地球引力:

$$\frac{\partial V(r)}{\partial r} + \frac{\partial T(r, \psi)}{\partial r} = -\frac{GM}{r^2} + \frac{Gm}{r_m^2} \sum_{n=0}^{\infty} n \left[\left(\frac{r}{r_m} \right)^{n-1} P_n(\cos \psi) \right], \quad (4)$$

上式第一项为正常地球引力, 它与 r 方向相反(为负号), 上式第二项为扰动引力, 它与 r 方向相同.

现讨论 $r=R$ (球面半径) 邻近一点 $(R+dr, \psi)$ 处并含异常质量的地球引力位, 有

$$\begin{aligned}
& V(r+dr) + T(r+dr, \psi) \\
&= V(R) + T(R, \psi) + \frac{\partial V(r)}{\partial r} \Big|_{r=R} dr + \frac{\partial T(r, \psi)}{\partial r} \Big|_{r=R} dr \\
&= \frac{GM}{R} + \frac{Gm}{r_m} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r_m} \right)^n P_n(\cos \psi) \\
&\quad - \left[\frac{GM}{R^2} - \frac{Gm}{r_m^2} \sum_{n=0}^{\infty} n \left(\frac{R}{r_m} \right)^{n-1} P_n(\cos \psi) \right] dr.
\end{aligned} \tag{5}$$

令 $r=R$ 球面上的地球正常引力位为常数 C , 则有

$$V(R) = \frac{GM}{R} = C.$$

设球面 $r=R$ 邻近点 $(R+dr, \psi)$ 上的地球引力位 $V(r+dr)+T(R+dr, \psi)$ 处也等于这一常数, 则有

$$\begin{aligned}
& \frac{GM}{R} + \frac{Gm}{r_m} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r_m} \right)^n P_n(\cos \psi) - \\
& \left[\frac{GM}{R^2} - \frac{Gm}{R^2} \sum_{n=0}^{\infty} n \left(\frac{R}{r_m} \right)^{n-1} P_n(\cos \psi) \right] dr \\
&= \frac{GM}{R} = C,
\end{aligned}$$

并有

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{GM}{R^2} - \frac{Gm}{R^2} \sum_{n=0}^{\infty} n \left(\frac{R}{r_m} \right)^{n-1} P_n(\cos \psi) \right] dr \\
&= \frac{Gm}{r_m} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r_m} \right)^n P_n(\cos \psi),
\end{aligned} \tag{6}$$

由(6)式可见: 在一般情况下, 左端方括号内之值和右端之值均为正, 故 dr 值亦为正, 因此, 可以证明地球外含有异常质量引起的大地水准面, 应在正常水准面之外.

不过对地球而言, (6)式左端括号内第二项异常质量产生的引力, 不论异常质量的大小、位置如何, 扰动引力都不足以影响左端括号的第一项中地球正常引力的正负, 而影响 dr 的正负只能在(6)式右端的扰动位处于如下情况.

在(6)式中的 $P_n(\cos \psi)$ 当 n 为 0, 1, 2, 3, 4 时, 有

$$\begin{aligned}
P_0(\cos \psi) &= 1, \\
P_1(\cos \psi) &= \cos \psi, \\
P_2(\cos \psi) &= \frac{1}{2} (3 \cos^2 \psi - 1), \\
P_3(\cos \psi) &= \frac{1}{2} (5 \cos^3 \psi - 3 \cos \psi),
\end{aligned}$$

$$P_4(\cos \psi) = \frac{1}{8} (35 \cos^4 \psi - 30 \cos^2 \psi + 3) \dots$$

从 $P_n(\cos \psi)$ 表达式中可看出: 其偶阶项均为正, 当奇阶项的 ψ 在 $\pi/2 < \psi < 3\pi/2$ 范围内为负, 仅当(6)式右端异常质量在 $\pi/2 < \psi < 3\pi/2$ 范围内, 即它在下半球范围内, 而偶阶项之和大于奇阶项之和数值时, dr 为正, 反之 dr 为负, 不过在通常情况下, 不会出现这一情况.

1.2 球内异常质量对球面上的点(p)引起的扰动位或大地水准面异常

现设球内异常质量(用高为 h 的球帽代替)的 m 与上述球外的情况相似, 则含异常质量的地球引力位为

$$\begin{aligned}
V(r) + T(r, \psi) &= \frac{GM}{r} + \frac{Gm}{d} \\
&= \frac{GM}{r} + \frac{Gm}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_m}{r} \right)^n P_n(\cos \psi), \\
&\quad r_m \leq r,
\end{aligned} \tag{7}$$

在 $r=R$ 球面附近的 $(R+dr, \psi)$ 点上含有异常质量的地球引力位为

$$\begin{aligned}
V(R+dr) + T(R+dr, \psi) &= \frac{GM}{R} + \frac{Gm}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_m}{R} \right)^n P_n(\cos \psi) \\
&\quad - \left[\frac{GM}{R^2} + \frac{Gm}{R^2} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) \left(\frac{r_m}{R} \right)^n P_n(\cos \psi) \right] dr,
\end{aligned} \tag{8}$$

在 $(R+dr, \psi)$ 邻近点上, 设包含有异常质量的地球引力位也等于地球正常位 GM/R 时, 如此(8)式等于 GM/R , 此时有

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{GM}{R^2} + \frac{Gm}{R^2} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) \left(\frac{r_m}{R} \right)^n P_n(\cos \psi) \right] dr \\
&= \frac{Gm}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_m}{R} \right)^n P_n(\cos \psi),
\end{aligned} \tag{9}$$

上式左端括号为正值, 右端亦为正值, 故 dr 为正值, 由此可知: 地球内含有正的异常质量的大地水准面, 仍在正常地球引力位的大地水准面之外. 当 m 为负值(质量亏损)时, 如海洋地区, (9)式变为(10)式:

$$\left[\frac{GM}{R^2} - \frac{Gm}{R^2} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) \left(\frac{r_m}{R} \right)^n P_n(\cos \psi) \right] dr$$

$$= -\frac{Gm}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r_m}{R} \right)^n P_n(\cos \psi), \quad (10)$$

上式左端括号内之值为正, 而右端为负, 故 dr 为负, 由此证明, 球内含有负异常质量时所引起的大地水准面, 在正常地球(椭球)之内.

因此在一般情况下, 不管异常质量在球内或球外, 只要看其质量是正(剩余)还是负(亏损), 就可决定其效应的正负. 此外在地球内若存在一些很大很深的异常质量, 在球面对称位置上亦会受到一定的影响.

2 青藏高原大地水准面异常的局部和区域效应及其特征

一点的大地水准面(异常)是扰动位的短、中、长波的叠加, 即 $dN = dN_1 + dN_2 + dN_3 + dN_4 + dN_5$, 它们是近表场 dN_1 、区域(较深处壳幔边界)场 dN_2 、深部质量 dN_3 和界面效应 dN_4 及深远处特大异常质量效应 dN_5 的总和, 但由于青藏高原面积很大, 约为 $250 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其四周的绝大部分为几处大的山脉所包环绕, 有喜马拉雅、昆仑(西)、阿尔金、祁连、巴颜喀拉等山脉.

实际上, 由 EGM-96、IGG-97 及其他重力场模型, 均可计算大地水准面异常(起伏), 而它们的值都比较接近. 从图 3 所示, 青藏高原(含周边)大地水准面(EGM-96)的等值线均为负值, 其最大值在西藏的西面约为 -18 m , 最小值约为 -58 m (在青藏北部的柴达木盆地), 呈现西高东低、南高北低的态势. 但从青藏的腹地而言, 它像一条鲤鱼, 鱼头向西, 且出露在国

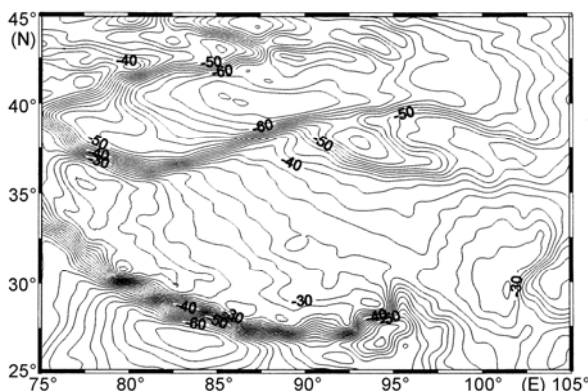


图 3 青藏高原大地水准面^[10](单位: m)

境线附近, 由西向东其值由大到小, 中部在 -30 m 左右, 接近尾部达 -37 m . 如按前节证明整个青藏的大地水准面理应为正值, 那么为什么会出现如此大的分布的负值呢? 作者认为, 其原因除了塔里木和刚盖(Gange)两盆地下部(水准面之下)负异常物质的效应外, 而深远处异常物质的效应是构成中长波长大地水准面为负的主要原因, 从面波层析成像的研究与重力、地震的联合反演的结果^[10], 证实了地壳密度西部比东部略高, 这是大地水准面自西向东逐步偏低的原因. 从波长的特征看, 正如文献[10]指出的那样, 它属于中短波长部分, 主要由于壳内各层间密度不均匀引起, 而下地壳与上地幔间密度的不均匀乃是引起中高频大地水准面异常的主要原因, 其次是中地壳与下地壳间物质不均匀所致. 此外区内柴达木盆地, 地处昆仑山、祁连山、阿尔金山之间, 属于面积较大海拔较高的沉积盆地, 由于其上广布沼泽、盐湖, 其下又埋有岩盐、煤、石油等矿藏, 致使其密度比围岩为小, 并导致大地水准面比高原腹部低 20 m 左右, 同时也对邻近山地的大地水准面产生了相当大的影响, 当然, 在大片比较平坦腹地的周边的高山(包括深大断裂)对大地水准面也会有影响, 不过这部分所占面积和比重都不大, 现将上述部分视为局部的影响, 用重力异常来计算, 并以 dN_1 表示, 把该区较深部(地壳厚度)的效应用 dN_2 表示, 把更深远处的主要效应当作区域性影响, 并用 dN_3 表示.

(1) 空间异常 Δg 与局部的地形起伏关系密切, 青藏高原中部地势虽较平缓, 但仍有一些崎岖的山地, 只不过它的相对高度比高原的其他部分要小, 这种局部地形的效应主要反映在重力场的高频及其甚高频部分. 国内外(包括我们的工作)的统计资料表明: 空间异常与高程变化在近 100 km 范围内, 两者相关程度达到 95% 左右^[6], 所以由它推得的大地水准面主要反映地球表层物质不均匀的分部, 其中包括可见地形的起伏和近地表的断层、溶洞、矿产等密度不均匀分布的影响, 但局部的地形起伏要占主要地位. 从文献[17]中的空间异常图可以看出: 在高原腹地空间异常变化不大, 大多在 $20 \sim 30 \text{ m s}^{-2}$ 之间. 现根据如下平面的斯托克斯公式可以计算出相应的大地水准面: dN_1 (这里所选的计算点, 它具有代表性的意义), 即: 选在安多以西的尼玛(约在 32.5°N , 88°E). 此处实际大地水准面值为 -32 m .

$$dN_1 = \frac{1}{2\pi\gamma} \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^s \Delta g ds. \quad (11)$$

这里其半径 s 取 550 km; 今取空间重力异常 $\Delta g = 25 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$, 并将它视在该区的平均值, 则由上式可以计算得到的值为 14.0 m; 至于腹地四周山区空间异常的分布, 多在 $100 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$ 左右, 现以之作为宽 50 km 环带的平均值, 由上式可计算为 5.1 m, 则它们的效应 $dN_1 = 14.0 + 5.1 = 19.1 \text{ m}$.

(2) 在青藏高原, 地形的波长已超过 1000 km, 其负荷已为增厚的地壳所补偿, 故这里的均衡异常很小, 多在零值附近摆动, 表明它基本上处于地壳均衡状态, 而布格异常的负值达 400 m s^{-2} 以上, 也表明地下有很大的补偿, 亦即地壳埋深很大, 详见地震横波反演得到的 Moho(莫氏或地壳深度见文献[13]中的图 6).

设文献[13]图 6 中 Moho 深度分布为 d , 它所引起的区域重力效应用 dN_2 来表示, 为方便讨论, 现将计算点取在腹地的中央(羌塘和拉萨块体交接处附近的尼玛), 现取正常地壳厚度: $H=30 \text{ km}$, 平均地形高度 $h=4500 \text{ m}$, 并用均衡理论(Airy-Heiskanen)按下式^[7]来估计:

$$\begin{aligned} dN_2 &= -\frac{2\pi G}{\gamma} \left[\int_H^{H+b} (\rho_c - \rho_m) z dz + \int_{-h}^0 \rho_c z dz \right] \\ &= \frac{\pi G}{\gamma} \rho_c \left[2Hh + \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_c} h^2 \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

由上式可以计算出均衡大地水准面, 不过其中上地幔与地壳的密度均来源于文献[13]中的横波波速资料(距地面深度分别为 30 和 120 km, V_s 为 4.42, 3.58 m s^{-1}) 和有关公式算得^[13], 有 $V_p = 1.73V_s$, $\rho = 0.818 + 311V_p$, $\rho_m = 3200 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_c = 2730 \text{ kg m}^{-3}$, $\gamma = 9.8 \text{ m s}^{-2}$ 为正常重力, G 值同前, $b = 5.81h$, 则上式计算值为 23.9 m.

我们还分别计算了地形和地壳均衡补偿的效应, 前者为 313 m, 后者为 -282 m, 补偿程度达 85%, 说明了地壳在大尺度的地形负荷下, 大部分为其厚度的增加所补偿.

(3) 同样, 由文献[13]可知, 取青藏高原由地表向下的深度为 d , 当 d 为 20~70 km 时, 随着深度的增加, 腹地的横波速度偏小且所占的区域也越来越小, 而高原周边低速的 v 值占有的区域块数却不断增多, 到了 125 km 时, 高原腹部(羌塘和拉萨块体)为最低,

该处为 $30^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 90^\circ \text{E}$ 所包围, 其 v 值均比周围的要低, 唯独在青藏高原西南侧仍存在一小块高速异常, 这对于广阔腹的低速异常区而言可以略去. 文献[13]图 6 提供的 Moho 最大深度可达 76 km, 且它与深度 $d=70 \text{ km}$ 处的横波分布的图像(文献[13]图 7(c))极为相似. 为便于估算, 这里用 75 km 代之, 并以此作为上顶面, 当深度 d 向下不断增加时, 其下各区域内横波速度的互差在逐步减小, 在 $d=175 \text{ km}$ 时(见文献[13]图 7(g)), 高原腹地($30^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 90^\circ \text{E}$)的波速, 除在其西侧为高值外, 其余均比周围的要低, 现我们可用一圆柱体来拟合, 并计算它所引起的效应, 此处设半径 a 为 270 km, 高为 $b=100 \text{ km}$ (自顶面 75 km 到底面 175 km), $c=175 \text{ km}$ 由上述相应的波速: 4.45 与 4.25 m s^{-1} , 推算密度差: $\Delta\rho$ 为 -65 kg m^{-3} , 并由(13)和(14)式^[18]与 Bruns 公式得到扰动位 T 及相应的 dN_3 为

$$\begin{aligned} T &= \pi G \Delta\rho \left[(c-b)^2 - c^2 - (c-b)\sqrt{a^2 + (c-b)^2} - \right. \\ &\quad \left. + c\sqrt{a^2 + c^2} + a^2 \ln \left(\frac{c + \sqrt{a^2 + c^2}}{c - b\sqrt{a^2 + (c-b)^2}} \right) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

$$dN_3 = T/\gamma = -48.3 \text{ m}. \quad (14)$$

(4) 从文献[13]的图 7 还可以看出, 在青藏高原下面 175~200 km 的横波速度异常基本上是正负相间, 可视为呈随机分布, 遂不考虑密度异常的影响. 同样在 200~420 km 处也视这里的密度为均匀分布, 基于目前有人正在研究上、下地幔的波速横向不均匀性的, 但尚未见到青藏高原下面的上、下地幔有可靠结果, 况且文献[14]也指出: 大约在 800~2600 km 之间的地幔物质分布是比较均匀的, 因此我们都把它们视为侧向均匀结构来处理. 不过对 420, 670 km 的间断面, 其上、下密度差引起的效应仍可作估算. 设在 420 km 处的球面上存在 1800 kg m^{-3} 的密度异常, 其在球心的圆心角 A 为 10° , 则顾及地球曲率的影响可用下式^[19]计算:

$$\delta N = 2\pi G \Delta\rho R \delta R \frac{r_0 - h}{\zeta \gamma}, \quad (15)$$

式中 $\zeta = R + h$, $\delta R = 200 \text{ m}$, $r_0^2 = R^2 + \zeta^2 - 2R\zeta \cos A$, A 为圆心角之半, 设为 5° , $\gamma = 9.8 \text{ m sec}^{-1} \text{ s}^{-2}$, $\Delta\rho = 180 \text{ kg m}^{-3}$, h 为球面距计算点的距离, R 为球的半径.

经计算得: $\delta N = 3.8 \text{ m}$, 对于 670 km 间断面时的 δN 则接近 0.1 m, 如此仅考虑上述两个间断面给大地

水准面带来的影响. 则 $dN_4 = 3.9 \text{ m}$.

(5) 核幔起伏的效应. 至今研究核幔边界的人仍然不少, 但彼此间相差很大, 甚至有量级之差, 尽管我们曾经也用重力方法做过同样的探究^[5], 但它是否接近真实值还难以肯定, 好在我们还可以寻找其他途径来探讨另一与地球深部物质分布有关的场源.

3 构成青藏高原大地水准面为负值的另一主要原因

为探求青藏高原以外的大地水准面的异常源, 我们首先从图 3 中明显地发现有四处: 一为塔里木盆地, 另一为刚盖盆地, 它们的幅值均达 -67 m 左右, 其中包括背景场的作用, 如果除去近 -30 m 的背景场, 则在场源中心处的值分别为 -30 m 左右. 上述两个负异常表明了异常源是属于质量亏损, 而在塔里木却体现了含油气沉积盆地的性质, 层析结果表明在地壳的中部和上部密度偏小, 而在下地壳与上地幔密度(波速)偏高, 它和印度地盾上的刚盖盆地的地壳密度相似, 与四周相比, 地壳密度都明显偏小, 故大地水准面为负, 因两盆地均受到来自南北方向板块的挤压, 故等值线呈椭圆形分布. 其中刚盖盆地与高原南缘(喜马拉雅)相接处莫氏面的突变, 使大地水准面产生剧烈的变化, 而塔里木盆地及其南侧莫氏面的突变, 也加剧了昆仑山处大地水准面的变化, 其梯度值也比较大, 该结果与文献[10]一致, 如此也抵消着上述两大山脉的正的影响, 由于上两个盆地的场源较浅, 经估算它们的重力效应主要表现在其附近, 而对远离它们的高原腹地的影响不大(估计为 2 m), 由于周围其他场源均比较小, 加之重力异常大致呈正负相间分布, 我们可以认为它们(包括两盆地在内)对青高原腹地的总的效应可以忽略. 从图 4 中还可看出, 因山脉与盆地相切处高差悬殊, 故在那里的大地水准面的等值线甚为陡峭, 其梯度可称为全球之冠.

最后一个异常可从大尺度的异常图或资料加以考察, 很易看出: 在 78°E , 赤道以北约 2.5° 处, 大地水准面的幅值达 -106.5 m , 此乃全球之最, 我们称此效应为 dN_5 ; 对于该异常源我们完全有理由认为, 它是地下很深处存在着一个巨大的质量亏损, 这在地震层析中也得到证实^[20]其深度可达核幔边界.

为便于讨论, 今将一个半径不大(因半径与柱长相比较小, 此处设它为 100 km)的垂直圆柱体视为线

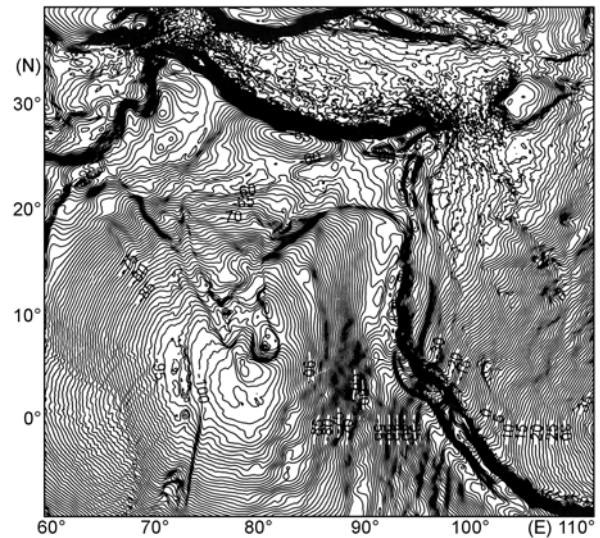


图 4 大地水准面图(陆洋提供)

柱体, 它的中心在印度洋水面上的投影为 78°E , 2.5°N ; 在 XYZ 右手坐标系中, 设该中心为坐标原点, 以 Z 轴向下为正, 单位长度的线密度为 λ (以 kg m^{-1} 表示, 且 $\lambda = \pi r^2 \Delta\rho$, $\Delta\rho$ 为圆柱体异常密度), r 为圆柱半径. 设其上顶面为 h_1 , 下顶面为 h_2 , 则根据下面的公式对该异常引起的扰动位(T)进行正反演得到

$$dT = \frac{Gdm}{D},$$

则

$$T = G\lambda \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{\sqrt{x^2 + z^2}} dz = G\lambda \log \left[\frac{h_2 + \sqrt{x^2 + h_2^2}}{h_1 + \sqrt{x^2 + h_1^2}} \right], \quad (16)$$

D 为被研究点 p 到圆柱体内质量元 dm 的距离, 当横坐标 $x=0$, 则

$$T = \pi Gr^2 \Delta\rho \ln \frac{h_2}{h_1} = \gamma dN, \quad (17)$$

且

$$\begin{aligned} T &= 3.1416 \times 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \times \Delta\rho \times \ln \frac{2850000}{300000} \\ &= 9.8 \times 106.5 \\ &= 1040 \text{ kgal m}. \end{aligned} \quad (18)$$

其中圆柱的下底深为 2850 km , 上顶深为 300 km , 它在岩石层以下. 根据相应的大地水准面异常值反算出柱体的异常密度为 -220 kg m^{-3} ; 如此可按(16)式推算 88°E , 32.5°N 处的尼玛(距异常体的垂直距离为 3340 km)的大地水准面为 -34.2 m .

实际上,在中印度洋盆地的上述地区存在一个高热流密度区,它的平均值达 83.7 mW m^{-2} ,这比大洋的平均值要高 $18 \text{ mW m}^{-2[21]}$,国家海洋局二所于2008年的印度洋考察中,也已发现距离该异常源地把中心的南侧较远处海底存在热液物质,这种热液可能来自地幔深处,其密度比周围介质的密度偏小,且那里常有地震活动和火山活动^[21,22].以上所有场源总的效应有

$$\begin{aligned} dN &= dN_1 + dN_2 + dN_3 + dN_4 + dN_5 \\ &= 19.1 + 23.9 - 48.3 + 3.9 - 34.2 \\ &= -35.4 \text{ m.} \end{aligned}$$

亦即上述异常密度的效应与EGM-96的结果-32 m相当接近,也就是说,本文对场源效应的分析基本是正确的.

顺便指出,地球的另一面即 240°E 的赤道附近,大地水准面异常值也比较大,很可能与 78°E 靠近赤道的特大异常源有关.我们在研究核幔起伏时^[5]曾利用三、四阶重力位系数,而此次则利用了全阶的位系数,因为在上述异常源中也包含了起重要作用的二、三、四阶的效应.此外在处理或模拟异常源时,无论是用柱体或球体拟合,都体现了场源的等效性.对场源进行探索性的解释,只有将来待地震等资料齐备时,才有可能对该场源的形状密度作确定性的解释.但不管怎样,由此计算得到大地水准面异常值不会有大的改变.

4 结论与讨论

经过本文的研究分析与对比,得到如下结论:

(1) 在大地水准面与正常(参考)椭球面相互联系的基础上,一般可定性地推导出参考椭球或球内外的异常(扰动)质量所引起的大地水准面(异常),其正负号由异常质量之正负而定,正值在参考椭球(球)之外,负值在该球之内;对于在地球内部又大又深的异常质量效应,上、下半球都会受到影响.但对被研究

点到场源的球面角距: ψ 而言,当 ψ 在 $\pi/2 < \psi < 3\pi/2$ 范围内,则另当有别论.

(2) 从理论上和实际计算上,都可以证明单纯由青藏高原的重力及地形均衡推得的大地水准面都是正值,它高出于参考椭球面约为 43 m .由地形及地壳补偿公式算得的结果相比较证明了补偿程度可达有 85% ,也说明青藏高原基本上接近于均衡状态.而腹地之外几个盆地对该区中部的大地水准面没有太大影响,但对周围山区倒有较大影响.

(3) 现今青藏高原的大地水准面为负值的主要原因是:一是地上地幔顶部存在低密度物质它的影响达 -48.3 m ;另一是受到 78°E ,赤道以北 2.5° 处既深又大异常质量的影响,其影响为 -34.2 m ,而在那里大地水准面的数值达 -106.5 m ,此乃全球之最,直至对中亚和南亚地区都有不少影响.

(4) 南北毗邻青藏高原的两大盆地,大地水准面(异常)有 -60 多米,但它们对高原腹地的影响较小.由于尚未发现青藏高原之下的上、下地幔可资利用的资料,这里仅对 420 和 670 km 间断面的影响作了讨论,不过其值很小.

(5) 在研究和圈定异常场源时,既要注意从地下深处去寻找(如上地幔顶部),还要从远程处去考察,在青藏这两者起着非常重要的作用,后一思路,可为其他高原大地水准面场源的分析提供参考.

需要指出,只有在对地球内部波速结构、密度分布充分了解的基础上,才能对大地水准面作出很好的解释,如今离开这方面的要求还有差距,这次仅做了大胆的探索和有益的赏试.在 78°E 的赤道附近,只有较详细的大地水准面的数据和部分地震层析图件,而我们采用的垂直柱体甚为简单,经初步模拟,它与大地水准面的实际值虽比较接近,但尚需等待有更丰富的资料,以修正大地水准面的模型.据我们所知,在地面采样岩石标本中,岩石的密度一般在 2670 kg m^{-3} 附近,而在均衡计算中地壳密度应采用 2730 kg m^{-3} ,这是否合适,也需进一步研究.

致谢 陆洋博士给本文提供了大地水准面图和热忱帮助,审稿人提出修改建议,谨此一并致谢.

参考文献

- 1 Bowin C. Depth of principal mass anomalies contributing to the Earth's geoidal undulations and gravity anomalies. *Mar Geod*, 1983, 7: 61-100

- 2 方剑, 许厚泽. 中国及邻区大地水准面异常的场源深度探讨. 地球物理学报, 2002, 45: 42–48
- 3 陆洋, 许厚泽. 青藏地区大地水准面形态及其与内部构造动力学关系. 地球物理学报, 1996, 39: 203–207
- 4 方剑, 许厚泽. 全球地幔密度异常及其构造意义. 测绘学报, 2000, 29: 6–20
- 5 张赤军, 任康. 由扰动位确定核幔起伏. 地球物理学报, 1994, 37: 115–119
- 6 Hager B H, Richard M. A Long-wavelength variations in Earth's geoid physical models and dynamical implications. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 1989, 328: 309–327
- 7 Turcotte D L, Schubert G. *Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems*. New York: John Wiley and Sons, 1982
- 8 张赤军, 方剑. 西藏与南亚大地水准面异常源及其动力学效应. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 112–118
- 9 冷伟, 傅容珊, 黄建华, 等. 大地水准面异常和非洲下地幔异常体的结构. 大地测量与地球动力学, 2006, 26: 63–69
- 10 柯小平. 青藏高原地壳结构的重力正反演研究. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2006
- 11 Jimenez-Munt I, Ferenandez M, Verges J, et al. Lithosphere structure underneath the Tibetan Plateau inferred from elevation, gravity and geoid anomalies. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 267: 276–289
- 12 陈胜早. 青藏高原-北印度洋地区的均衡大地水准面异常和岩石圈构造. 大地构造与成矿学, 1992, 16: 367–378
- 13 徐果明, 姚华建, 朱良保, 等. 中国西部及其邻域地壳上地幔横波速度结构. 地球物理学报, 2007, 50: 193–208
- 14 滕吉文. 固体地球物理. 北京: 地震出版社, 2003
- 15 孙岩昧, 张中杰, 滕吉文, 等. 青藏高原物质侧向流动的讨论——面波层析成像的证据. 见: 张中杰, 主编. 中国大陆地球深部结构与动力学研究. 北京: 科学出版, 2004. 872–880
- 16 陈赞, 张中杰, 胡家富, 等. 青藏高原及邻区 Love 波速度横向展布特征. 见: 张中杰, 主编. 中国大陆地球深部结构与动力学研究. 北京: 科学出版, 2004. 773–782
- 17 中国岩石圈动力学图集编委会. 中国岩石圈动力学图集. 北京: 地震出版社, 1991
- 18 Heiskanen W A, Moritz M. *Physical Geodesy*. San Francisco: W. H. Freeman Company, 1967
- 19 Yijerison H. *Potential Theory and its Applications in Earth's Shape Theory and Geophysics (in Russian)*. Moscow: Print and Editorial Department of Science and Technique in U.S.S.R, 1936
- 20 傅容珊, 阵凌, 黄建华, 等. 全球地震层析地幔横向不均匀及大陆动力学. 地球物理学进展, 1995, 10: 51–62
- 21 Verzhbitsky E V, Lobokovsky L Y. On the mechanism of heating up of the Indo-Australian plate. *J Geodyn*, 1993, 17: 27–38
- 22 Majumdar T J, Krishna K S, Chatterjee S, et al. Study of high-resolution satellite geoid and gravity data over the Bay of Bengal. *J Current Sci*, 2006, 90: 1–4