等效密度的概念—用重力确定沉积盆地深度的关键

Vadim A Litinsky

刘万松　译

摘要　在多层沉积盆地上观测得到的重力异常与对具有相同形状和深度的盆地计算所得到的结果密切相关。后者盆地由同一类沉积物充填，且其密度与前者的等效（加权平均）密度相等。因此，盆地至少有一个已知深度点的话，根据剩余重力异常就可算出其相对等效密度。假定密度是深度的函数，用无限大平板（布格）公式可推出重力与深度的关系式，该关系式结合重力数据可算出盆地深度或绘出其等厚线图。本文将分析密度与深度、重力与深度的指数及新型双曲线函数关系，并结合重力数据用来确定加利福尼亚州 San Jacinto 地堑、南部的亚利桑那州 Tucson 盆地的深度。双曲线函数比指数函数更可靠、更接近实际。根据 Tucson 盆地中最深的一个钻孔上的剩余重力异常，用无限大平板公式算出该盆地沉积物的相对等效密度以及密度与深度的关系。上述钻孔打到了深度为3.66km的前始新世基岩。Tucson 盆地中密度与深度的双曲线关系，假定它对于南部的亚利桑那州和西南部的新墨西哥州的其它所有盆地和山脉地区也适用。用无限大平板公式很容易将密度与深度的函数关系转换成重力与深度的函数关系。利用重力与深度的双曲线函数关系，可将该地区的每个盆地的剩余重力异常图转换成盆地深度等值线图。用重力数据算出的盆地深度与搜集到的钻孔资料（19口井）比较可以看出，本文提出的这种简单快速方法，其计算结果与真实深度的误差范围大约为13%。

1 绪　论

在一个沉积盆地中进行重力勘探的主要目的是要勾画出该盆地的形态。为此，沉积层剖面内的密度信息是必要的。若盆地中密度随深度的变化已知，并且能用简单的数学式子近似表出，则根据剩余重力异常利用计算程序 (Cordell, 1973; Ferguson et al, 1988) 就可以算出盆地底部的形态。但这些计算程序通常是很复杂的。

在这篇文章中我提出简单方法：（1）若盆地中至少有一点的深度根据钻孔、地震或其它物探数据已经掌握，用重力数据确定密度与深度假设的函数关系中的参数；（2）用假设的密度与深度的函数关系计算沉积盆地深度。该方法简单，甚至可以不用计算机，

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

但精度可以同以计算机为基础的先进算法相媲美。

提出本方法的主要思想基于以下两点：（1）充填盆地的沉积物其等效密度的概念；（2）用无限大平板（布格）公式根据重力数据计算相对等效密度和盆地深度。

2 等效密度

沉积物密度随深度增加（主要由于压力），有时在较深的盆地中接近于基底的密度。因此，沉积物与基底之间的相对密度随深度增加而减小。对于一个 n 层的沉积盆地，每层具有不同的厚度 h_i 和不同的相对密度 ρ_i，ρ_i 随深度增加而降低。沉积物的加权平均密度 $\overline{\Delta\rho}$（相对密度），称其为等效密度（相对密度），可以用下式计算：

$$\overline{\Delta\rho} = \frac{\Delta\rho_1 h_1 + \Delta\rho_2 h_2 + \cdots + \Delta\rho_n h_n}{h_1 + h_2 + \cdots} = \frac{\sum \Delta\rho_i h_i}{\sum h_i} = \frac{\sum \Delta\rho_i h_i}{H} \qquad (1)$$

式中 H 为沉积物的厚度即盆地深度。

在一个实际盆地中由于沉积层密度和厚度的变化而产生的重力异常其大小和形状与同实际盆地具有相同形状和深度的理论模型上的重力异常密切相关。该理论模型由同一类沉积物充填，其密度等于实际层状盆地的等效（加权平均）密度。图 1 是两个宽窄不同有五层沉积的盆地模型上部重力异常与相同盆地中由同一类沉积物充填时，其上部重力异常的比较。后者相对密度等于前者的相对等效密度。上述五层模型的密度、深度参数与加利福尼亚州 San Jacinto地堑剖面(Cordell, 1973)相吻合。由公式(1)算得的沉积物相对等效密度是 $-532.9\text{g/cm}^3 \cdot \text{m}/2400\text{m} = -0.222\text{g/cm}^3$（表 1）。较宽的五层沉积盆地模型与该盆地只有同一类沉积物充填时，两者的异常大小在中间相吻合，但形状在盆地两侧稍有差别。

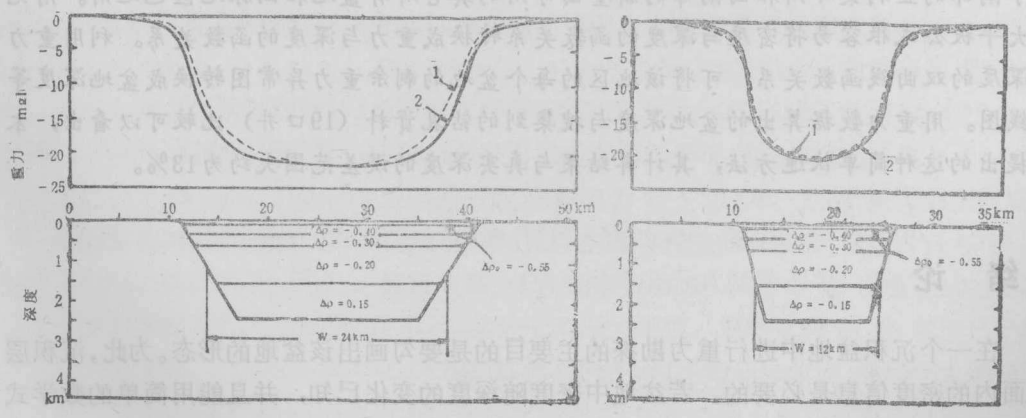


图 1 宽（左侧）、窄（右侧）两个盆地，当它们由五个沉积层充填时的重力异常（实线）与具有同一相对等效密度的一层沉积物充填时重力异常（虚线）的比较

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

表 1. San Jacinto 地堑沉积物的相对密度和相对等效密度

地层岩性	厚度h_i(m)	相对密度$\Delta\rho_i$(g/cm³)	乘积$\Delta\rho_i x h_i$(g/cm³m)
不饱和冲积土	46	−0.55	−25.3
浅层饱和冲积土	254	−0.4	−101.6
深层饱和冲积土	300	−0.3	−90.0
上部第三纪碎屑岩	920	−0.2	−184.0
下部第三纪碎屑岩	880	−0.15	−132.0
总和	2400		−532.9

(据Cordell, 1973)

如图 1 所示，由于盆地边缘的影响，在较窄的盆地上方，五层沉积与单一沉积模式间的重力异常差异增加了。在较窄盆地的中央，两者差异为0.5mGal即五层沉积模式异常（−20.3mGal）的2.4%。在实际中，这样小的误差可忽略。

等效密度的概念导致出两种方法：（1）如果盆地至少有一个已知深度点，根据重力值，采用无限大平板公式算出等效密度；（2）利用无限大平板公式

$$\Delta g = 2\pi G \bar{\Delta\rho} H \qquad (2)$$

依据等效密度与深度的函数关系，导出重力值与深度的函数关系。公式（2）中G为万有引力常数；$\bar{\Delta\rho}$为相对密度（在我们这里，是相对等效密度），单位是g/cm³；H为平板厚度。

3 论无限大平板公式的应用

应用无限大平板公式所产生的误差大小取决于盆地的宽度W和深度H之间的关系。我计算了一些具有不同W/H值的五层沉积盆地（如图 1 所描绘的）上的重力异常。在图 2 中，计算机算出的异常Δg_c同平板公式（2）对具有等效密度的层状沉积模型算出的异常Δg。相比较。对于层状沉积模型，Δg总是大于Δg_c，两者间差异随W/H的增加而减少。多数情况下，地台区典型的沉积盆地$W/H \geqslant 10$，用平板公式产生的误差约为2.5%或更小。亚利桑那州和新墨西哥州的盆地、山脉地区，W/H在5～10的范围内，相应的误差范围是5～15%。

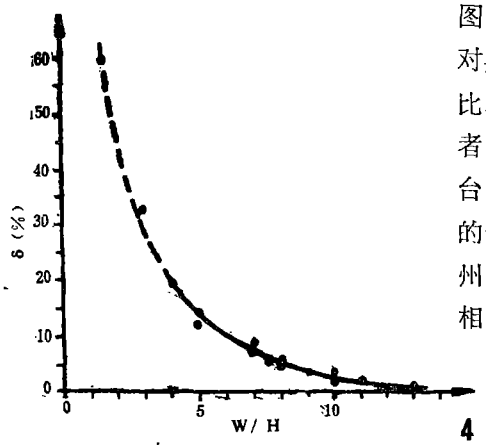


图 2 用平板公式和等效密度算出的$\Delta\rho_i$与五层沉积模型算出的Δg_c比较，重力计算误差$\delta = (\Delta g - \Delta g_c)/\Delta g_c$。误差取决于W/H，即盆地宽度与深度的比值

4 密度与深度、重力值与深度的指数及双曲线函数关系

如果密度与深度的函数关系已知，则据等式（1）可导出计算相对等效密度的公式

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

$$\overline{\Delta\rho} = \int_0^H f[\Delta\rho(h)]\,dh \Big/ H \tag{3}$$

这里$f[\Delta\rho(h)]$是密度与深度的函数关系式，H是沉积物厚度（盆地深度）。在数学上给出了许多沉积物密度与深度之间简单函数关系的成功例子（Athy，1930；Maxant，1980）也许最方便和常用的公式是密度与深度的指数关系（Athy，1930）：

$$\rho = \rho_{max} + \Delta\rho_0 \exp(-bh) \tag{4}$$

式中ρ_{max}是沉积物的最大密度（基岩密度）；$\Delta\rho_0 = \rho_0 - \rho_{max}$是密度增加的总量；$\rho_0$是沉积表层的密度；$h$是深度；$b$是常数，量纲为长度的倒数。

相对密度的指数表达式为：

$$\Delta\rho = \Delta\rho_0 \exp(-bh) \tag{5}$$

根据等式（3），计算相对等效密度的公式为

$$\overline{\Delta\rho} = \Delta\rho_0[1 - \exp(-bH)]/bH \tag{6}$$

H为盆地深度。将此式代入无限大平板公式（2）则沉积盆地上的重力异常为：

$$\Delta g = 2\pi G\Delta\rho_0[1 - \exp(-bH)]/b \tag{7}$$

若等效密度已知，据等式（7），盆地深度为：

$$H = [-\ln(1 - b\Delta g/2\pi G\Delta\rho_0)]/b \tag{8}$$

Cordell（1973）推出了与（7）、（8）两式相同的式子。他采用的是不同于本文的更复杂的推导。

我导出了密度与深度的双曲线函数关系，这一关系比指数函数关系简单：

$$\rho = \Delta\rho_0 \frac{\beta^2}{(h+\beta)^2} + \rho_{max} \tag{9}$$

β是具有长度量纲的常数，$\Delta\rho_0$是沉积表层的相对密度，h是密度为ρ的沉积层的深度；ρ_{max}是最大（基岩）密度，它可看作盆地基底的密度。在深度$h=0$时，$\rho = \Delta\rho_0 + \rho_{max}$，相对密度公式具有下列形式：

$$\Delta\rho = \Delta\rho_0\beta^2/(h+\beta)^2 \tag{10}$$

据等式（3），等效密度为：

$$\overline{\rho} = \Delta\rho_0\beta/(h+\beta)^0 + \rho_{max} \tag{11}$$

相对等效密度为：

$$\overline{\Delta\rho} = \Delta\rho_0\beta/(H+\beta) \tag{12}$$

β是深度增加时相对密度的衰减系数。当$h=H=\beta$时，$\overline{\Delta\rho} = 1/2\Delta\rho_0$，$\Delta\rho = 1/4\Delta\rho_0$，也就是说当$\beta$等于某一深度时，该深度基础上的沉积物相对等效密度等于表层相对密度的一半；在此深度时，水平沉积层的相对密度等于表层相对密度的四分之一。

基于平板公式（2）和等式（12），密度与深度呈双曲线关系时，重力异常表达式为：

$$\Delta g = 2\pi G\Delta\rho_0\beta H/(H+\beta) \tag{13}$$

若H以公里为单位，则

$$\Delta g = 41.85\Delta\rho_0\beta H/(H+\beta) \tag{14}$$

从等式（13）或等式（14）可得到盆地深度：

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

$$H = -\Delta_3\beta/(\Delta_3 - 41.85\Delta\rho_0\beta) \tag{15}$$

这里H以公里为单位，

当盆地深度趋于无穷时，重力异常〔等式（13）〕趋于最大值：

$$\Delta_{3max} = 41.85\Delta\rho_0\beta \tag{16}$$

5 密度与深度、重力值与深度函数关系中参数的确定

要确定密度与深度、重力、与深度函数关系中参数（指数形式中的b，双曲线形式中的β），先要确定盆地中的等效密度。若从一些独立的数据（如密度测井，岩芯样品，重力测井）中掌握盆地剖面上密度值，则等效密度可以用公式（1）算出，如表1所示那样。若盆地中仅有一个深度已知点C，无其它可用于剖面上的密度信息，则等效密度用无限大平板公式（2）可求得：

$$\overline{\Delta\rho} = \Delta g_c/2\pi GH_c = \Delta g_c/41.85H_c \tag{17}$$

Δg_c是c点的剩余重力异常值，H_c是该点盆地深度值。

沉积表层的相对密度$\Delta\rho_0$可从岩石标本密度测定、井中重力测量、密度测井以及重力数据中〔Nettletons(1939)剖面法〕得出。已知相对等效密度值和沉积物表层附近的相对密度，很容易得出密度与深度函数关系中的参数。对南部的加利福尼亚州靠近河滨地区的San Jacinto地堑上的数据（Cordell，1973）我应有本方法。该盆地的密度剖面，依据地震数据和等式（1）得出的相对等效密度值在表1中给出。

据Cordell（1973）的结果，在盆地上方剩余重力异常是－23mGal；地堑深度是$H_c = 2.4$km。据（17）式得$\overline{\Delta\rho} = -23/(41.85\times 2.4) = -0.229g/cm^3$。在表1中算得的真正相对等效密度是$-0.222g/cm^3$。用重力数据算得的相对等效密度，其误差仅为3%。

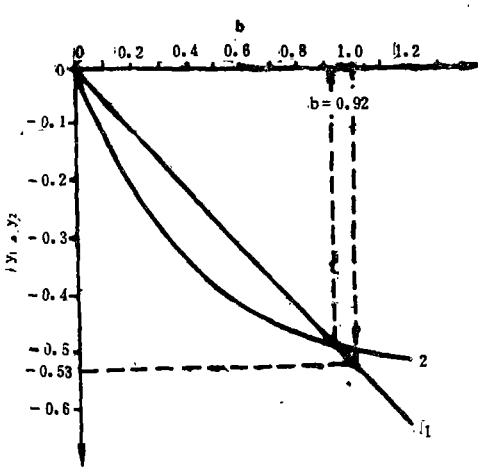


图 3 指数方程$\overline{\Delta\rho} = \Delta\rho_0[1-\exp(-bH)]/bH$中求取常数b的图解法结果
数据来自加利福尼亚州San Jacinto地堑。线段1为$y_1=\overline{\Delta\rho}Hb$，线段2为$y_2=\Delta\rho_0(1-\exp(-bH))$。这里$\Delta\rho_0=-0.55g/cm^3$，$\overline{\Delta\rho}=-0.222g/cm^3$，$H=2.4$km

5.1 密度与深度的指数关系

我提出两种方法分别用来确定计算相对密度的（5）式和计算相对等效密度的（6）式中所含常数b。对第一种情况：

$$b = \{\ln|\Delta\rho_0| - \ln|\Delta\rho_i|\}/h_i \tag{18}$$

h_i是相对密度为$\Delta\rho_i$的第i层深度，竖杠表示绝对值。从钻孔或地震数据确立的密度——深度表中，必须算出不同深度的相对密度；算出的b值要取平均。

这种方法比利用（6）式确定相对等效密度的第二种方法精度低。分析（6）式可知，用该式确定b是不行的。因为b在等式中出现了两次，且第二次以指数形式出现。让我们重新将（6）式写成这种形式$\overline{\Delta\rho}bH = \Delta\rho_0[1-\exp(-bH)]$，用图解法解此方程。方程左

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

侧为线段$y_1=\overline{\Delta\rho_0 Hb}$，右侧为线段$y_2=\Delta\rho_0[1-\exp(-bH)]$。如图3所示，解为两条线段的交点。

表示相对密度的指数方程（5）、表示相对等效密度的指数方程（6）、表示重力异常的指数方程（7）与San Jacinto地堑深度的关系曲线在图4和图5中给出。

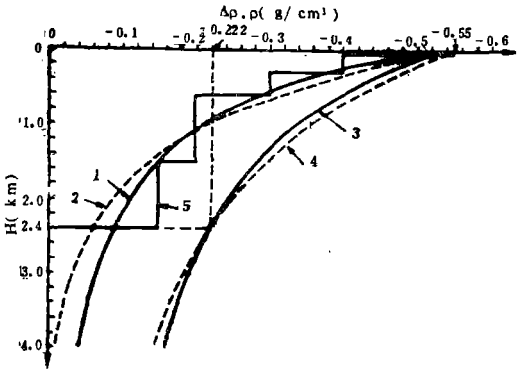


图 4 比较加利福尼亚州San Jacinto地堑中相对密度相对等效密度与盆地深度之间的指数函数关系和双曲线函数关系

曲线1-相对密度与深度的双曲线关系；2-相对密度与深度的指数关系；3-相对等效密度与深度的双曲线关系；4-相对等效密度与深度的指数关系。这里$\Delta\rho_0=-0.55g/cm^3$，$b=0.92/km$，$\beta=1.624km$；5-各层相对密度与深度关系模式(据Cordell 1973)

现在让我们用公式（8）来计算该地堑的深度，$\Delta g=-23mGal$，$\Delta\rho_0=-0.55g/cm^3$，$b=0.92$：

$$H=-\{\ln[1+0.040(-23)]\}/0.92=2.74km$$

本计算结果误差是(2.74-2.4)/2.4即14%。

公式(8)对于重力异常值是很敏感的。因为从等式(7)来看，即使地堑的深度趋于无穷，$b=0.92$时，重力异长的最大可能值是-25.02mGal。因此，由于相对密度随深度而降低，重力的影响在接近2.4km深度时显著降低。为了证明公式（8）的敏感性，Cordell假定剩余异常刚好是-22.3mGal，而不是-23mGal，则计算的地堑深度与地震数据（2.4km）相吻合。

Cordell（1973）提出了一种用重力场及其垂向导数来算盆地深度的递归计算法。基于该算法，对任意选择的两个b值b=0.5和0.1，他得出了两种构造结果（图6）。当b=0.5时，得到良好的结果（H=2.4km)。尽管这不符合层状密度模型（注意，b的真正值为0.92)。对于b=1.0，Cordell的结果H=5.5km与实际不符。

用图5中公式（7）的曲线和图6a中San Jacinto盆地上的重力异常值，我得出

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

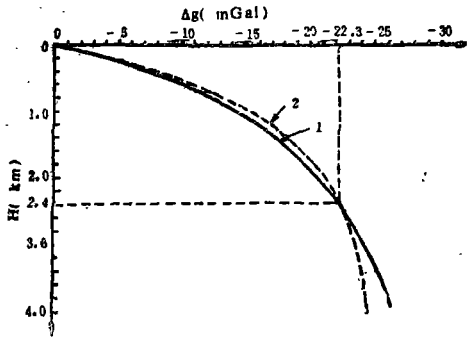


图 5 重力异常与加利福尼亚州 San Jacinto 地堑深度间指数和双曲线关系的比较

曲线1-双曲线关系；2-指数关系。有关参数同图4

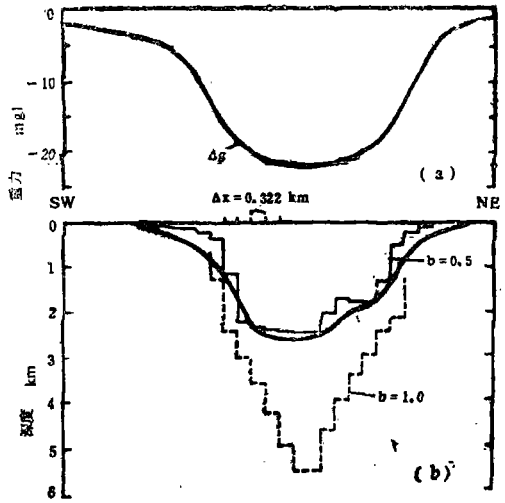


图 6 (a) San Jacinto 重力剖面 (b) 推导出的构造模型

对于b=0.5和1.0的解释结果用阶梯线表示。我用$\Delta g=41.85\Delta\rho_0(1-\exp(-bH))/b$.当b=0.92时的曲线得出的解释结果是光滑曲线。在构造剖面b中，水平和垂直比例尺相同

了如图所6b示的该构造解释结果。我的构造解释结果当 b = 0.92时，与 Cordell 的结果 (b = 0.5时) 十分接近。

5.2 密度与深度的双曲线函数关系

参数 β 可由两种方法获得。若盆地的密度剖面及相应的 $\Delta\rho_0$、$\overline{\Delta\rho}$ 值已知，则 β 可以从等式 (12) 中导出：

$$\beta=\overline{\Delta\rho}H/(\Delta\rho_0-\overline{\Delta\rho}) \tag{19}$$

该公式可写成 $\beta=\alpha H$，$\alpha=\overline{\Delta\rho}/(\Delta\rho_0-\overline{\Delta\rho})$是由密度剖面确定的系数。盆地中接近表层的相对密度 $\Delta\rho_0$ 和相对等效密度 $\overline{\Delta\rho}$ 之间的关系确定了描绘盆地中密度的数学曲线特征。

若沉积盆地深度和沉积表层密度已知，对于 San Jacinto 盆地 β 可由 (13) 或 (14) 式表示：

$$\beta=\Delta gH/(41.85\Delta\rho_0H-\Delta g) \tag{20}$$

根据 (19) 式：

$$\beta=\frac{\overline{\Delta\rho}H}{\Delta\rho_0-\overline{\Delta\rho}}=\frac{-0.222\times2.4}{-0.55-(-0.222)}=1.642\text{km}$$

用 (20) 式：

$$\beta=\frac{-\Delta\rho H}{41.85\Delta\rho_0H-\Delta g}=\frac{(-23)2.4}{41.85(-0.55)2.4-(-23)}=1.712\text{km}$$

两者间相对误差为 (1.712−1.624)/1.624即5%。

该地堑深度 ($\Delta g=-23$mGal时)，由 (15) 式得：

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

$$H=\frac{-\Delta g\beta}{\Delta g-41.85\Delta\rho_0\beta}=\frac{-(-23)\times1.624}{-23-41.85(-0.55)1.624}=2.60\text{km}$$

算出深度与地震数据（2.4km）间相对误差仅8%，比指数型等式（8）14%的误差要小。对于2.4km的深度，公式（14）算出的重力异常为－22.3mGal。

相对密度、相对等效密度、重力异常三者与深度间指数和双曲线函数关系的比较在图4和图5中给出。对于相对密度，双曲线关系比指数关系同观测到的（阶梯状）相对密度吻合要好。相对密度的指数关系曲线趋于零的速度快于双曲线关系曲线。相应地，重力异常与深度的指数关系曲线接近最大可能值(25.02mGal)的速度快于双曲线关系曲线〔37.4mGal，当$\beta=1.624$km时，由（16)式得出〕。重力与深度的指数关系曲线在2.4km附近比双曲线型曲线陡。这就是用双曲线公式计算深度时误差小的原因。因此，重力与深度呈双曲线关系的（15）式对重力值的敏感性比指数关系的(8)式小。所有这些事实得出如下结论：密度与深度、重力与深度呈双曲线函数关系比指数关系更可靠、更接近实际。密度与深度的双曲线关系也可以用来研究重力压缩力，沉积物孔隙度以及密度与速度的关系。

6 确定位于亚利桑那州和新墨西哥州盆地—山脉地区的盆地深度

6.1 假设密度与深度为双曲线关系时的深度计算

用已经表过的Tucson盆地的深度资料计算出相对等效密度和参数β。盆地中最深的钻孔之一位于亚利桑那州〔Exxon—Humble no.1—ST(32)〕(图7示，略)。该钻孔打穿了新生代沉积层，打到前始新世的石英二长岩，深达3.66km（12008ft）。

靠近钻孔的剩余重力异常值约为－21mGal，把接近地表的冲积土和湖底粘土的密度选为$\rho_0=2.25\text{g/cm}^3$，（据Eaton，1972）。用2.7g/cm^3作为高密度的基底密度值（Aiken和Summer，1974；Davis，1971），则靠近表层的沉积物相对密度为$\Delta\rho_0=-0.45\text{g/cm}^3$。

当Hc＝3.66km时，由（17）式算得Tucson盆地的相对等效密度值为：

$$\overline{\Delta\rho}=\frac{-21(\text{mGal})}{41.85\times3.66\text{km}}=-0.137\text{g/cm}^3$$

由（19）式得出参数β：

$$\beta=\frac{-0.137\text{g/cm}^3\times3.66\text{km}}{[-0.45-(-0.137)]\text{g/km}^3}=1.602\text{km}$$

并且，

$$\alpha=\frac{\overline{\Delta\rho}}{\Delta\rho_0-\overline{\Delta\rho}}=0.438$$

图8给出了相对密度$\Delta\rho=f(H)$和相对等效密度$\overline{\Delta\rho}=f(H)$的函数曲线，曲线是由双曲线方程（10）和（12）以及指数方程（5）和（6）算得的。指数曲线中b取0.86的值由前面所述的图解法求得。$\Delta\rho$的指数曲线在$H=\beta=1.6$km之前，趋于零的速度小

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

于双曲线。然后，深度大于 β 值时，指数曲线降低速度加快。$\overline{\Delta\rho}$曲线也显示了类似性质，它们在 $H_C = 3.66km$ (12000ft) 点处相交。在该点以下，指数曲线趋于零的速度快于双曲线。在深度 $H = \beta = 1.6km$处，$\Delta\rho = -0.112g/cm^3 = 1/4\Delta\rho_0$；$\overline{\Delta\rho} = -0.225g/cm^3 = 1/2\Delta\rho_0$。

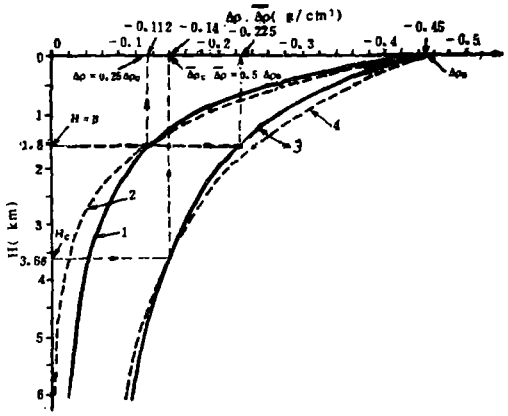


图 8 Tucson 盆地中相对密度和相对等效密度与基底深度的关系曲线

曲线1-双曲线型相对密度；2-指数型相对密度；3-双曲线型相对等效密度；4-指数型相对等效密度；$\Delta\rho_0 = -0.45g/cm^3$，$\beta = 1.6km$，$b = 0.86\ 1/km$

与 Tucson 盆地深度呈指数和双曲线等式关系时绘出的重力异常曲线在图9中给出。在深度 $H_C = 3.66km$ 以上，对于指数公式，重力值随深度增加较快；在该深度以下，曲线性质改变。当 $H = \infty$ 时，指数公式中重力异常最大值为 $-21.9mGal$，双曲线公式中为 $-30.2mGal$。用这些曲线从剩余重力异常数据中能够很容易确定盆地深度即沉积层的厚度。

6.2 盆地深度等值线图的绘制

有时盆地剩余重力异常图反映的不仅仅是局部地质构造引起的重力异常。这是由于有残留的区域场影响。要减少这种影响，就要在每个盆地建立几个重力剖面并与相应的地质图共同分析。在每个盆地与相邻山脉的接触带上，存在有高密度的基底岩石，在重力剖面上必须将其去除（图10）。剖面两端点必须用重力值定为零的直线相连接。然后“观测”剖面上必须重新确定相对“区域”场的剩余值其次，剩余重力异常剖面上的点必须用图 10c 中的垂向比例根据图 9 中 $\Delta g = f(H)$ 的曲线赋予深度。这些深度必须移到剩余重力异常图中相应的剖面位置上，参照重力等值线，将剩余重力异常图转变成盆地深度等值线图。

如果有一张“真正”的剩余重力异常图，将其转变成盆地深度等值线图非常容易。人们仅需参照重力等值线，采用与重力—深度关系曲线相同的间隔，就可画出深度等

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

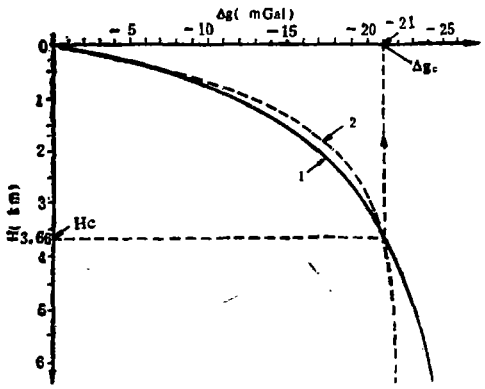


图 9　Tucson 盆地中重力异常与基底深度的关系

曲线1-双曲线型；2-指数型。有关参数同图8

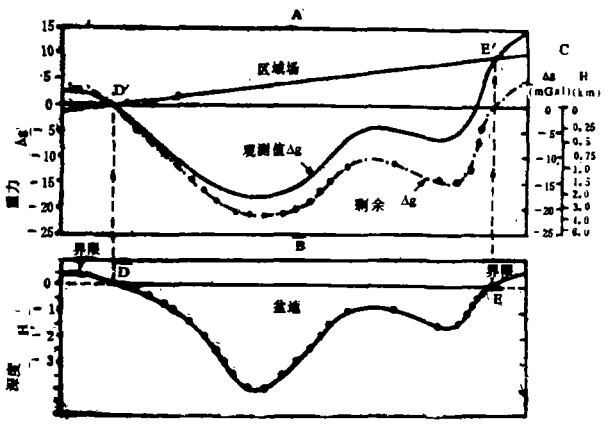


图 10　剩余重力异常剖面

(A)将异常转变成盆地深度剖面;(B)采用的垂向重力——深度比例尺；(C) D 和 E 是沉积盆地与相邻山脉的接触点 ；D′和E′为上述点在重力剖面上的投影 ；实点为重力剖面上按垂向比例相应深度等于0.25，0.5，0.75，1.0km等的点

值线。

图 11 给出了 Tucson 盆地的剩余重力异常图（据Davis，1971，图 4）。将其视为真正的剩余异常，用不到半小时的时间，我画出了一张该盆地的基底深度等值线图（图12）。剩余异常的最大值位于 Tucson 盆地的南部，达到－26mGal，相应的基底深度为10km。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

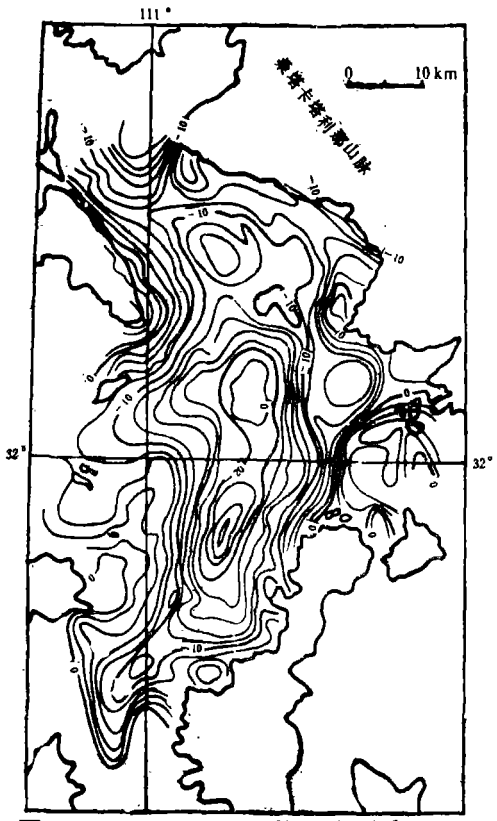


图 11 Tucson 盆地的剩余重力异常图

等值线间距为 2mGal，盆地中央的黑点为 Exxon—Humble no.1—ST (32) 钻孔

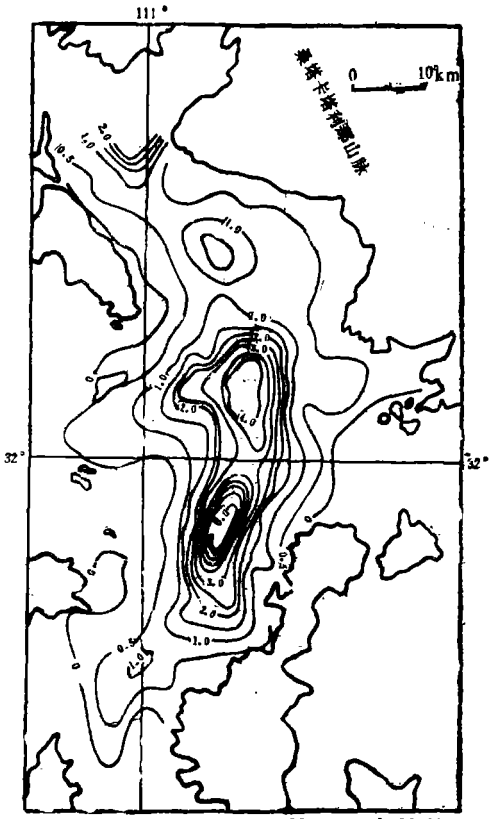


图 12 Tucson盆地的基底深度等值线图

等值线间距为 0.5km。盆地中央的黑点为 Exxon—Humble no.1—ST (32) 钻孔

6.3 对确定深度过程中产生误差原因的分析

在一个大区域中，我们不能期望所有盆地都有相同的沉积历史。一些盆地中含有盐床，其密度小于沉积岩。在这种情况下，沉积剖面上相对密度必须增加，相对等效密度也同样。

在具有相同基底深度的情况下，含盐床盆地的重力负异常比不含盐盆地的负异常大。因此，用 $\beta = 1.6$km 来计算含盐床盆地的深度，结果将比实际深度大。相反，盆地中含有致密的火山物质（例如玄武岩），则重力负异常将减小。因此，算出的深度比实际深度浅。

确定深度过程中的另一个误差来源是重力测点分布不好。用于确定区域重力场和随之而来的剩余重力场的方法，取决于有足够的测站沿盆地边缘及与之相连的基岩露头分布。因此，测站分布不好，以及重力测量中的误差，也是划分区域场和剩余场的不良因素。

重力异常与盆地深度之间的关系具有双曲线性质（图 9）。当该盆地深度在 1.5～3km 范围内时，0.3km 的变化将导致相应的重力异常变化 1mGal。故 1mGal的剩余重力异常误差将导致深度上 0.3km 即约 13%的误差。当盆地的深度在 3～5km 范围内时，1mGal 的误差能导致 0.6km 即约 15% 的误差。类似地，当该盆地的深度超过 5.2 至 8km，1mGal 的重力误差将引起 1.2km 即18%的误差。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

然而，计算深度过程中引起误差的最大原因也许是沉积盆地中石盐矿床的存在。可以作为例证的有位于西北部亚利桑那州的Red lake盆地，其中至少有1.2km (4000ft)厚的石盐；Luke盆地（靠近Phoenix的盐河谷），那里石盐床的厚度超过1.8km (6000ft) (Pierce, 1981; Eaton etal, 1972)。厚盐床与低密度沉积物将产生很强的重力负异常，有时超过－31mGal，这是我使用β参数以来的最大异常。对于含盐床的沉积盆地上如此强的重力异常进行盆地深度推断，将会导致结果的不精确（太深)。在这个区域中，超过－25mGal的强剩余重力异常出现，就可以认为是厚盐床存在的标志。在Tucson盆地的南部，剩余重力异常达－26mGal，说明很可能有盐床存在，并且真实深度要小于计算的10km。在图12中，我画的最深等值线为6km。

6.4 依据重力数据计算的盆地深度与钻孔资料的比较

1983年，我为EDCON公司完成了对南部的亚利桑那州和西南部的新墨西哥州重力数据的推断解释。Tucson盆地中密度与深度的双曲线关系被认为对图7所显示的勘测区域中其它所有盆地也是适用的。为了评价本方法的精度，用19口井的资料与解释推断结果进行对比。这些井分布在这一地区的不同盆地，分别打穿了新生代地层（白垩纪），打到了古生代即前寒武基底，下面是计算深度与这些井中深度数据的比较结果。

由重力数据计算的深度与钻孔深度资料两者的平均差异为$\bar{\delta}=\sum\delta_i/19=-60$m。推断解释的深度有规律地小于钻孔数据确定的深度。绝对平均差异$|\delta|=\sum|\delta_i|/19=145$m。差异的标准偏差为

$$S=\sqrt{\frac{\sum\delta_i^2-(\sum\delta_i)^2/19}{19-1}}=\pm 176\text{m}$$

相对或加权平均差异（相对于钻孔深度）是$\sigma=\sum|\delta_i|/\sum H_i=12.6\%$。这里$H_i$是一口井的深度（这些井的平均深度是$\bar{H}=\sum H_i/19=1153$m）。

用这种简单而快速的方法依据重力数据确定的盆地深度，与真实基底深度的误差在13%这样一个合理范围内。Ferguron et al (1988) 对内华达州盆地、山岭地区的yucca Flat盆地的古生代基底用重力异常计算其深度，发表了类似的数据结果。利用先进的反演技术，Ferguson et al得出结论，这些以计算机为基础的方法推断地下新生代与古生代地层接触面的起伏是在现今地表下100～1200m范围内，与真实深度误差在150m以内，即大约15%的误差。

7 结 论

用这种简单、快速方法根据重力数据确定盆地深度，对于一个地区油气藏的初步推断以及为地震、钻井勘探制定方案提供信息，其精度是足够的。

本方法所求出的结果与其它利用假设密度函数的方法具有同样的精度。当按照布格平板近似公式应用本方法时，求出的三维结果比得上三维模似结果。

致谢及参考文献略

译自《Geophysics》, Vol.54, No.11,1989,p. 1474～1482

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne