

首都圈地区重力场的时空变化^{*}

华昌才 果 勇 刘端法 肖 钢

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

J. T. Kuo Walter Brown

(New York 10 027 Columbia University, U. S. A.)

摘 要

首都圈地区的高精度重力测量工作已开展多年。本文叙述该地区近 8 年(1981—1988 年)来的重力场主要变化特征。南部及东南部有较大的重力变化, 其最大量级可达 $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 北部地区相对较稳定, 如承德, 以及测网西侧的太行山区边缘完县, 重力变化显著的地区是天津、霸县、任丘等地, 且和垂直形变相吻合, 重力变化的主要原因在于抽取地下水和石油所致。

主题词 重力反演; 垂直形变; 地下水

引 言

我们在 1985 年已简要讨论过京、津地区的重力变化, 在该地区的高精度重力测量工作至今已实施了 10 年。本文着重探讨 1981—1988 年重力场变化。本区测线在 1984 年以前有 4 条, 此后增加两条东、西向测线: 西至张家口, 东至北戴河, 合计为 6 条测线。基本上使用 3 台 LaCost-Romberg LCR-G 型重力仪 No. 147, No. 570 和 No. 596。

从目前情况来看, 原有的 4 条测线已有 20 余期资料, 新增加的测线也已有 10 期资料。1988 年又有水准测量资料(国家地震局测量大队提供)。所以, 有必要再讨论测区的重力场变化, 并给出可能的合理解释。

1 测量精度及重力场变化

1.1 观测精度

为了获得可靠的重力变化($10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 量级), 重力仪在野外的实际观测精度是最为重要的。我们把重力仪的读数经过归算及各项改正, 即可求得重力差, 这些都按常规处理。

* 国家地震局地球物理研究所论著 95A0011。

1994 年 2 月 17 日收到初稿, 1994 年 9 月 22 日收到修改稿并决定采用。

LCR-G 重力仪的观测精度或误差的主要原因在于仪器内部的结构和外部的观测环境. 前者的影响约为 $5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 后者约为 $7 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 综合影响约为 $10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

本文不具体分析温度、气压等各个干扰因素的影响, 仅从改正“线性修正系数”的角度分析在野外工作时, 单台重力仪作往返观测的精度.

我们使用的 3 台重力仪 No. 147, No. 570 和 No. 596 长期在高崖口基线场上标定相对比例系数, 其最大差值约为 3.0×10^{-4} ; 在“85 国家基本重力网”长基线上 3 台仪器的最大比例系数差为 2.5×10^{-4} , 这些都是在作基线标定中得到的. 但在首都圈的野外工作条件下能否显示这一差别? 我们进行如下讨论.

3 台重力仪都是在相同的工作环境下进行测量. 显然, 它们各自都有系统误差. 特别是格值的标定精度. 从理论上说, 这 3 台仪器对某一重力的段差范围内的实测结果会有所不同, 亦即存在相对稳定的互差. 因此在实测工作中, 能否反映仪器互差, 也就可定出仪器实际工作状态的测量精度.

现在先分析两台仪器的情况, 其余可类推. 假设: Y 为 No. 147 测量的段差绝对值, X 为 No. 596 测量的段差绝对值, a 为它们的比值.

显然

$$Y = aX$$

$$(Y - X) = (a - 1)X$$

把 n 个段差叠加, 即有

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)/n = (a - 1) \sum_{i=1}^n X_i/n \quad (1)$$

式(1)反映了两台仪器观测值的相互关系, 只有保证很好的精度, 式(1)才能对观测值成立. 设

$$C = \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)/n \quad (2)$$

根据每期测量结果, 由式(2)我们可求得每期的 C 值. 若每期的 C 值至少能保持相同的符号, 即可判断两台仪器明显相关. 若是常数, 说明仪器制作极为精良. 所以, C 值是衡量仪器的一个指标. 若以纵坐标代表 C 值, 横坐标为各期重力测量的顺序, 可作出 C 值曲线. 这样, 就可更加直观地看出 C 值随各期测量的变化概貌(见图 1).

由图 1 可见, 在实测结果中, C 的正、负及其数值都呈现很大的随机性, 几乎呈正态分布. 这表明, 在首都圈的野外测量中看不出由于格值的不一致所导致的对测量结果的影响或差异.

在首都圈测网中最大段差值约为 $80 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 根据格值的差异, 两台仪器间的

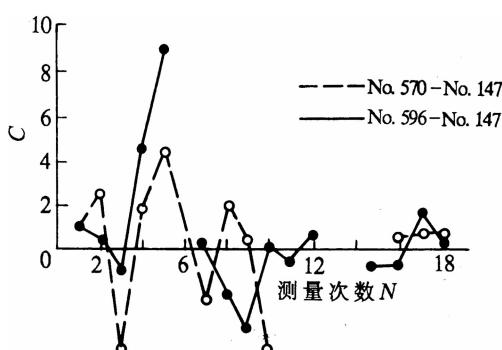


图 1 C 值统计图

测量互差可以有 $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 据误差理论, 单台仪器的观测误差只有小于 $10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 才可能反映这个测量互差. 事实上, 我们的野外资料确实也不反映这个测量互差. 其他测量队在首都圈的工作结果也是这样. 正因为野外测量结果显示不了各台仪器的格值差异, 反过来也就说明了, LCR-G 型重力仪的单台往返观测的精度也就是 $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

我们统计了 3 台仪器 10 年的平均零漂率为表 1 中所示.

它们在野外工作期间零漂率为 $(300-400) \times 10^{-8} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})/\text{月}$. 在汽车运输状态下, 仪器的动态零漂率约为 $(2-3) \times 10^{-8} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})/\text{h}$, 如此小的零漂率保证了所需的测量精度.

根据大量资料的统计(包括若干其他测量队), 中误差的平均值(多台仪器)约为 $(7-8) \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 通过长期的观测实践, 明确了单台仪器的实际观测精度, 符合 80 年代初的布网要求: $10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

1.2 测区重力场的变化

首都圈测区共有 6 条测线组成, 南部的 3 条构成两个闭合环(华昌才, 1987). 全网的中心在北京, 且以天安门作为基点(计算起点). 各测点的重力值都从天安门起算, 点值的误差为 $10\sqrt{n} \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

天安门测点常和玉渊潭、白家疃、香山 3 个绝对重力点相联测, 未发现有超过误差范围的变化. 再则, 天安门附近的水位变化也仅约 1 m, 所以, 它作为稳定的基点是可靠的.

本网结构简单, 中心选取合理, 所以直接计算的段差值与用经典平差及拟稳平差所得到的结果无实质性区别. 差值很小, 基本相同. 特别是重力场变化的基本形态没有什么差异, 这里不讨论它们细节上的差别.

全测区共有近 60 个测点, 取作正式计算的段差共有 47 个. 8 年来, 其中点值超过 $40 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的约占 28%, 且主要集中在东南及南部, 如天津、任丘、霸县、保定等; 变化量不大于 $20 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的约占 37%, 主要分布在北京近区及北部偏东地区, 如承德位于 D 线的终端, 平均变化不超过 $10 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 其它如西南的完县、韩村也较为稳定.

图 2 显示了较稳定的和变化大的重力点. 北京重力值变化平稳, 任丘重力值明显呈线性增加.

表 1 3 台仪器 10 年平均零漂率表

仪器号	596	570	147
零漂率 $10^{-8} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})/\text{月}$	207	281	69

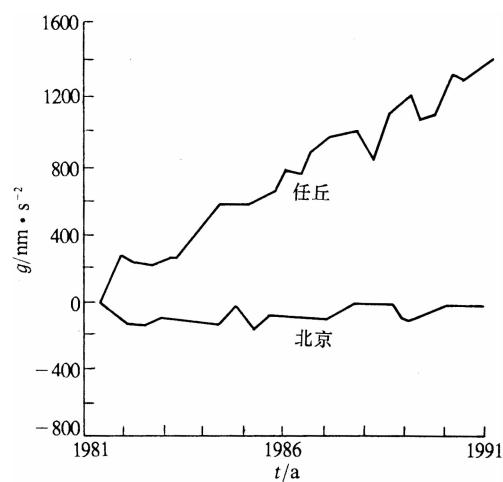


图 2 北京、任丘重力变化

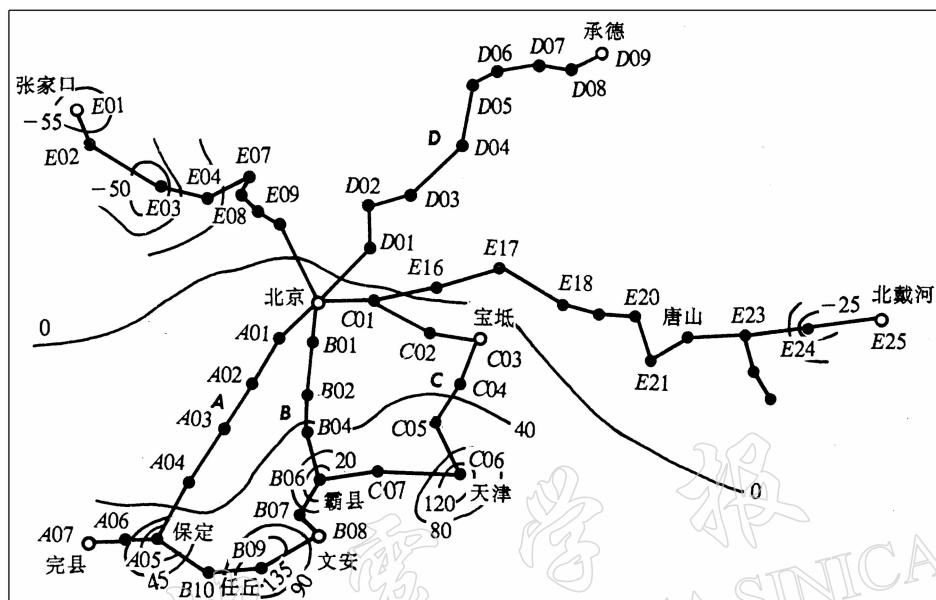


图 3 16 个重力变化等值线图(1988—1981)

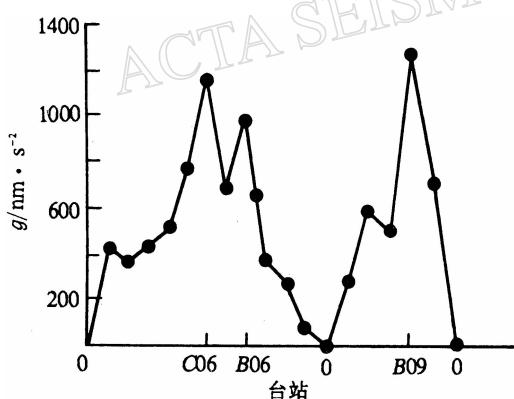


图 4 重力变化剖面

图 3 是重力等值线图。它显示了最大变化的重力点：天津、任丘等超过 $100 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，而在测区的东北及西北两侧，如张家口及北戴河却显示出负值。图上零线以北为负值。特别是在东、西两侧有较明显的负异常。图 4 是由 A, B, C 测线构成的两个闭合环上的点组成的重力剖面，主要为 $C_{01}, C_{02}, C_{03}, C_{04}, C_{05}, C_{06}, C_{07}, B_{06}, B_{04}, B_{02}, B_{01}, B_{00}, A_{04}, A_{05}, B_{10}$ 和 B_{09} 。

根据图 3 及图 4 可看出重力场的基本变化形态。变化幅值较大的地区就在测网

的南部及东南部。

2 讨论分析重力变化

重力场不仅在空间分布上有变化，如应用于重力勘探；且随着时间也有变化，如重力场伴随地震孕育过程而变化。只是数量级较小，一般约为 $(10^1—10^2) \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，如唐山、海城地震的重力变化。重力变化主要就是引力的变化，只要质量分布随着时空有变化，就会有相应的重力变化。首都圈重力监测网常年重复测量，它们在面上的位置是固定的（相对而言）。只要测网地区的质量分布逐年变化，就会引起重力场变化。

观测点下方可能发生形变，同时密度也可能变化；此外，也可能有物质通过裂隙、空洞流动，亦即物质迁移。总之，是在观测时间段内质量分布有了变更。因而，测点的重力会发生变化。

首都圈地区的地质构造运动，一般情况下短期内不会有明显的变化，地震瞬间等除外。但人为因素对环境的影响有时短期内往往很可观，如天津、任丘、沧州等地面沉降都在 $10-10^2$ cm 量级。国内外对有关地面的快速沉降都作了充分的观测研究，并且证实了大量抽取地下水等造成地面的大幅度沉降。如 60 年代上海地区地面沉降；再有，如美国加利福尼亚、墨西哥等。

我们目前观测到的重力变化呈正增长的地区恰恰也就在沉降区，故可推论抽取地下水等引起形变和新的质量分布，因而使重力增加。

整个首都圈地区的主要重力变化如上述。我们重点讨论重力变化较大及精度高的地区（由于水准等资料问题，暂不讨论东、西两个负值区）。

根据国家地震局测量大队提供的垂直形变资料作出重力剖面上的垂直形变曲线。

由图 4 和图 5 的对比可看出：两者非常对称——镜像对称。沉降区基本上与重力变化大的地区相吻合，仅在幅度上（归算后）有某些差异。

在沉降地段及其外围，选取了 16 个点的重力和高程资料，并作出 G （重力变化值）和 H （高程变化）的相关分析，则有

$$G = 30.7 - 2.3H \quad (3)$$

由此可知重力和高程的比率是 2.3×10^{-8} ($m \cdot s^{-2}$)/cm。它的物理意义是什么？如果把地面的沉降 ($H < 0$) 看作是由于抽取地下水导致的，水的密度取作 1，则层厚为 H 的水被抽掉，观测点又下降 H ，此时重力梯度值（比值）接近 2.3。也可看作与水有关的布格梯度。事实上要严格区分是自由空气改正还是布格改正还是有困难的。其一，仅有 16 个点资料；其二，大部分点位沉降值 (H) 小于 15—20 cm。所以，所求出的梯度值的精度是不够的，但至少可提供一个粗略的近似看法。

上面讨论了地面沉降的因素，即形变的影响。另外，还须考虑地下水位下降引起的质量问题。

地下水基本上可分为 3 种情况：一是土壤水，它不是重力自由水，不会形成水流，影响较小；二是封闭的承压含水层，含水层有上下不透水的顶板封隔。此种井的水位升降只反映了压力的大小，不代表 Δh 厚水层的缺失，故不直接影响重力值，但能引起地面沉降；三是潜水层，它在地下的层位介于土壤水和承压水之间。它的上表面为非承压的自由水位，该水位的升降反映了测点下方地下水的增多或减少。含水层水位降低，就是反映了其孔隙内水流失；反之则为流入。 Δh 厚水层（孔隙水）对重力有贡献，它直接影响

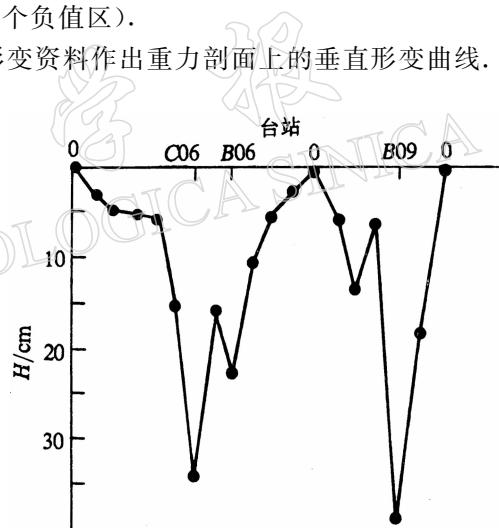


图 5 垂直形变剖面

测点重力的大小，通常按无限平板层考虑，即为下式：

$$\Delta g = 0.42 \Delta \rho \Delta h \quad (4)$$

式中， Δh 为水位的沉降或上升， $\Delta \rho$ 为岩层的给水度， Δg 为重力变化。要对重力改正，只要考虑式(3)及式(4)即可。在我们的情况下作了式(3)的改正，已去掉了主要部分；再去掉式(4)的影响，最后的剩余重力值若在误差范围之内，不再考虑其它因素对重力变化的影响。

3 结 论

首都圈地区近 10 年的施测工作发现了大致 $10^2 \times (10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$ 的重力变化。这一重力变化主要是在天津、任丘、霸县等地区大量抽取地下水或石油，诱发了地面大幅度的沉降，结果是重力值大幅度增加。反过来，也可以利用高精度重力仪来监测地面的沉降，特别是城市及采油区等。

参加本工作的有郑金涵、沈晶、张征宇、刘克人、卢红艳等，国家测绘局测绘研究所江志恒协助制图，陈运泰教授对本文提出宝贵意见，垂直形变资料由国家地震局测量大队提供。特此一并致谢。

参 考 文 献

- 华昌才、郑金涵，1983a. 苏鲁皖地区拉科斯特 G 型重力仪测定结果对比. 地震地磁观测与研究, **4**, 54—56.
- 华昌才、郑金涵，1983b. 使用 G 型重力仪进行昆明、西安基线场测量工作中发现的问题. 地震地磁观测与研究, **4**, 57—60.
- 华昌才、肖钢，1984. 相对重力测量的双程工作法. 地震地磁观测与研究, **5**, 37—39.
- 华昌才，1987. 京津唐地区的重力变化. 地震学报, **9**, 319—325.
- 华昌才、果勇、江志恒，1991. 拉科斯特重力仪的格值标定. 地震学报, **10**, 248—253.
- 田岛捻一，1979. 松代地震の重力变化. 测地学会志, **20**, 153—157.