中国科学 D辑:地球科学 2008 年 第 38 卷 第 4 期: 432 ~ 438
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

1987~1998 年间唐山铅垂线变化及其与周围地震的关联

李正心[①②*], 李辉[③]

① 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
② 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;
③ 中国地震局地震研究所, 武汉 430071
* E-mail: shaolzx@yahoo.com;

收稿日期: 2007-10-30; 接受日期: 2008-03-06
国家自然科学基金项目资助(批准号: 10633030)

摘要 利用中国北京-唐山重力网 1987~1998 年间 46 期重复重力测量的资料计算了唐山所在地的铅垂线变化. 将所得铅垂线变化的测量结果与唐山周围同期发生的 38 次地震($M \geqslant 4$) 比较后发现, 两者之间关联. 唐山邻近的地震, 以及其周围的地震, 其发生的时间往往与唐山铅垂线开始反向变化的时间相符合.

关键词
铅垂线变化
华北重力网
局部重力场变化
地震

人类很早就知道利用水准面和铅垂线来观天测地, 并认为自然界提供的这一测量参考是固定不变的. 随着科学技术的进步, 人们懂得了地球内外质量的运动变化可能影响地面一点铅垂线的方向, 并开始注意它可能的变化. 例如在 1925 年, 日本天文学家木村向国际大地测量协会IAG报告了水泽纬度测量值中出现 0.18″的异常变化, 并认为这个铅垂线变化与邻近的地震有关[1]. 但科学界首先解决了的是地外天体运动的影响. 根据固体潮理论, 可以精确计算出日、月、大行星等地外天体运动对地面铅垂线方向的影响[2]. 这也就是铅垂线变化中的潮汐项. 对木村提出的问题, 即是否还存在着另一种铅垂线变化, 即由地球内部质量运动变化所致的变化, 一般称之为“非潮汐的铅垂线变化” (以下简称为铅垂线变化, 或 Plumb Line Variations: PLV), 却一直没有结论. 国际天文学联合会IAU和国际大地测量协会IAG一贯重视对此问题的研究[3~5]. 但时至今日, 进展仍然有限. 主要原因是, 对这样一个主要依靠实验来认识的科学问题, 人们在实践中却缺少一种有效而又易行的实验手段. 光学天体测量是唯一对铅垂线变化敏感的技术[4], 照理可用它对其进行测定. 但是当它仍然使用着用地面天文观测资料编制的星表时, 在理论上就不能认为这是在对铅垂线变化进行完全准确无误的测量, 因为在地面进行天体测量时得到的结果中所含有的这种铅垂线变化已经进入了所编制的星表, 尽管其影响不一定很大. 此外, 在一年观测的进程中因星区不同而带来的星位误差, 其幅度往往比铅垂线变化本身还要大[6], 对铅垂线变化的测定也带来了困难. 近年来发展的天文重力两种技术并行观测的方法[7,8], 仅有的一个实例是对华沙大学Jozefoslaw天文大地测量台所在地铅垂线纬度分量变化的研究, 且限于其年际变化波段[6].

天文时间纬度测量以仪器所在地的铅垂线作为测量的参考, 铅垂线的任何变化都会进入到它的观

测残差中去. 残差中如出现异常, 就容易使人联想到这可能就是邻近地震所致的铅垂线变化. 1966 年中国发生了邢台大地震以后, 北京天文台李致森等[9]率先进行了天文时纬观测残差异常与地震发生关系的研究. 中国众多的科研工作者在这方面做了大量的工作, 积累了许多实例及进行了多方面的探讨, 先后发表的文献达数十篇之多[9~15], 引起了国内外学术界的重视. 上述IAU地球自转(19)委员会在 1991 年IAU 21 届全会通过的决议[4]及继后IAG成立的专门研究组[5]也都说明了这一点. 但是由于当时的条件, 研究工作还是受到了一定的限制. 例如, 那时空间天文的依巴谷星表尚未发表[16], 所用的仍然是由地面天文观测编制的传统星表[17]. 学术界对地震能否引起铅垂线的变化, 这个变化又有多大, 并没有定论. 对发现的天文时纬观测残差异常的解释还存在不同的认识. 人们确实还无法完全排除这样的可能性, 即这个异常另有原因, 譬如大气异常折射, 特大的观测误差或仪器等方面种种可能的原因. 在这种情况下, 单凭天体测量这一方面的实践是难于说服所有的人的. 如何用多方面更多更确凿的事实来揭示铅垂线变化的存在和弄清其量级, 进一步论证和地震之间的关系, 实在也是继续深入这项研究时所必需进行的一项基础性研究工作.

自 20 世纪 80 年代以后, 中美两国地球物理学家对中国华北地区地震的合作研究倾注了长期持久的热情[18]. 无论是对局部重力场变化与地震发生关系的认识[19], 还是在物理模型的建立, 流动重力测量结果在地震预测中的应用等多个方面[20,21], 都取得了一系列重要的科学成果. 特别是京津唐张地区重力网的建立和 20 年来积累的科学观测数据, 其测点密度大, 观测精度高和连续时间之长, 都是国内外所绝无仅有[18]. 有了这样一份高精度重力网的重复测量资料, 是否也可以用它来对铅垂线变化这个问题进行某些探讨呢?

用重力测量方法来测定垂线偏差, 这是大地测量的一项常规工作[22]. 用重复重力测量的方法来测量垂线偏差的变化, 即铅垂线的变化, 这在理论上也没有大的问题[7,23]. 但需要一个足够规模的重力网, 还要对它进行了长时期高精度的重复测量以后才有可能对铅垂线变化进行实际的研究. 多年来国际上很少见到这方面的文献[23], 大概也是因为一直缺乏这样的条件所致. 现在, 中国已具备了这样的条件.

20 世纪 80 年代建立的中国华北, 滇西重力网已积累了大量高精度的重复测量数据. 作为一次尝试, 本文作者曾用部分华北重力网的资料计算了北京天文台所在地的铅垂线变化, 证明中国重力网的资料可用于铅垂线变化的测量; 与同时期北京天文台光电等高仪的时纬观测残差比较以后还证实了所得铅垂线变化结果的真实性, 尽管在南北方向上两种技术的测量结果符合得还不够理想[23]. 面对这份测量结果, 特别是看到铅垂线随时间的起伏以后, 人们不禁还是要问, 它是铅垂线的变化吗? 如果是真的铅垂线变化, 那又该如何去解释它的这种反复起伏? 这说明, 光进行这样的比较研究还是远远不够, 需要进一步工作, 寻找新的研究路线. 受到上述中美两国科学家工作[18]的启发, 作者开始注意到地震这个因素, 设想它是否也可以在研究铅垂线的变化中起到作用. 我们将同样地从局部重力场变化与地震发生的关系入手[18,19], 但是, 不再是这两者之间的直接比较, 而是通过重力场数据计算的铅垂线变化来进行比较, 既可确认铅垂线变化的存在, 又可能为地震的研究闯一条新路. 由于唐山地震十分密集(见图 1), 本文取唐山的铅垂线变化作为该地区的一个代表. 研究证明, 1987~1998 年间唐山地区存在着明显的铅垂线变化, 量级为 0.2″~0.3″, 而其测量中误差要小一个量级, 为±0.02″~±0.03″左右; 因此所得铅垂线变化的测量结果是可信的. 与同期唐山周围$M \geq 4$ 的 38 次地震作比较以后, 发现唐山铅垂线的变化与这些地震的发生相关联, 即地震发生的时刻与铅垂线开始反向变化的时刻相关联: 不论是邻近的还是周围远方的地震, 往往都发生在唐山铅垂线开始反向变化的时刻. 这些事实, 不仅从另一个侧面描述了中国华北地区“局部重力场变化与地震发生的关系”[18,19], 同时也为中国华北地区存在铅垂线变化, 包括它的量级, 提供了新的有力证据.

1 北京-唐山重力网与 1987~1998 年间的唐山铅垂线变化(Plumb Line Variations: PLV)

为了测量北京天文台所在地的铅垂线变化[23],

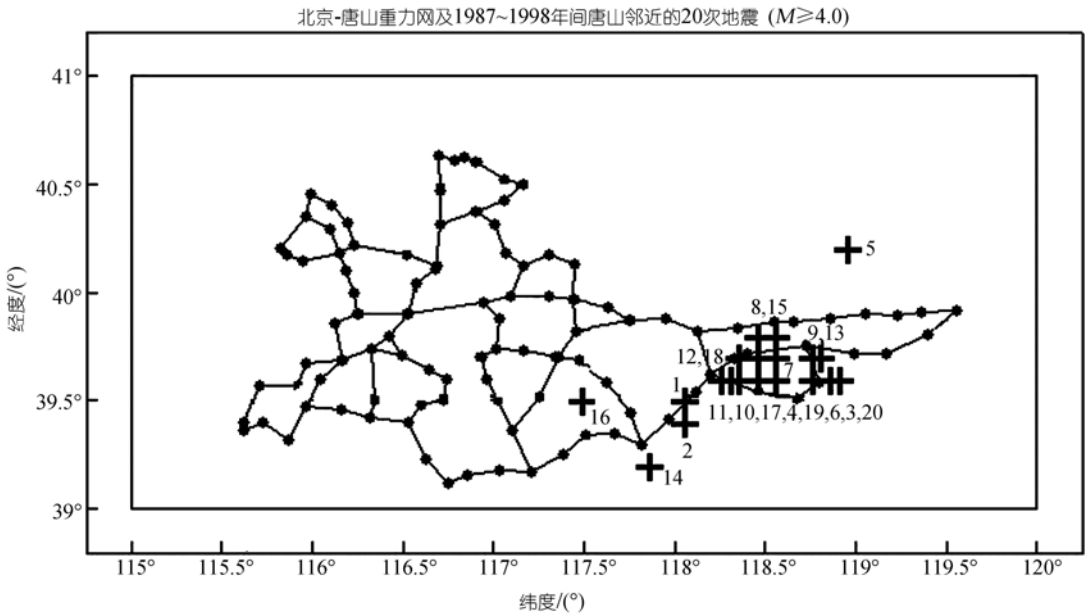

图 1　北京-唐山重力网及 1987~1998 年间唐山邻近 20 次地震(Mb≥4.0): 1~20 次

我们曾搜集了中国华北重力网在 115°~120°E, 39°~41°N这一范围内的资料 [24]. 为了行文的方便, 这一部分网称为北京-唐山重力网(图 1). 对该网 1987~1998 年间的重力测量数据曾进行了一次重新处理. 对每一期野外原始观测的资料按中国地震部门通用的标准软件LGADJ和方法 [25,26]进行处理, 有效地排除和削弱了资料中的系统误差和偶然误差. 为了在时间域测量铅垂线的变化, 对 1987~1998 年间的 46 期重力数据还进行了一次整体平差处理. 其中包括计算重力场变化的空间基准, 以得到各期测量结果的比较基准; 用网内绝对重力测量的资料计算重力场变化的时间基准, 给出各期计算起算点的重力值; 标定所用几台LaCoste & Romberg G 型重力仪的参数等. 具体处理细节可参见文献 [27]. 为了进行铅垂线变化的计算, 还使用 Kringe 网格化方法给出了网区范围内总共 61×25 结点(间格为 0.0833°)的重力平滑值 [24].

计算地面一点铅垂线变化的公式为 [7,23,24]

$$\begin{pmatrix}\Delta\xi\\ \Delta\eta\end{pmatrix}=-\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\Delta g Q(\psi)\begin{pmatrix}\cos A\\ \sin A\end{pmatrix}\mathrm{d}\psi\mathrm{d}A, \quad (1)$$

其中$\Delta\xi$, $\Delta\eta$分别代表铅垂线变化 PLV 的纬度和经度分量, A 代表该点到测得重力变化值Δg 的那一点的方位角, ψ 表示球面角距, $Q(\psi)$表示曼尼兹函数.

现在用同样的公式和数据来计算唐山地区的铅垂线变化. 具体计算点的坐标为东经 118.6°, 北纬 39.7°(图 1 中地震 7 所在地), 在唐山市的东面, 位于周围重力网点的重心, 希望能提高一些结果的测量精度 [28]. 计算所得 1987~1998 年间唐山铅垂线的变化见图 2 所示. 对所得 46 个测量点进行线性回归分析后得到如下的结果: 相关系数r = 0.8125 (置信度 99%), 回归直线的斜率b = 0.4335, 剩余标准差s = 0.024″, 46 个点的重心为(–0.033″, –0.019″), 回归直线(图 2 中的虚线OX)的方位角α= 66.5°.

将坐标系平移到上述重心, 然后逆向转轴 23.5°, 得到新的坐标系 XOY. 我们将用唐山铅垂线变化在这个新的XOY坐标系中的坐标, 主要是X坐标, 来讨论铅垂线变化与地震发生的关系.

2　唐山及其周围地区 1987~1998 年间的地震

表 1 列出了 1987~1998 年间唐山邻近 Mb≥4.0 的 20 次地震(表中 1~20, 并见图 1), 及唐山周围地区 Mb≥4.4 的 18 次地震(表中 21~38, 并见图 3). 前者中发生时刻接近, 地点相近的一些地震在表中被列为同一组, 总共有 9 组. 各组以震级最高的一个地震作为代表, 在表中以粗体字表示之.

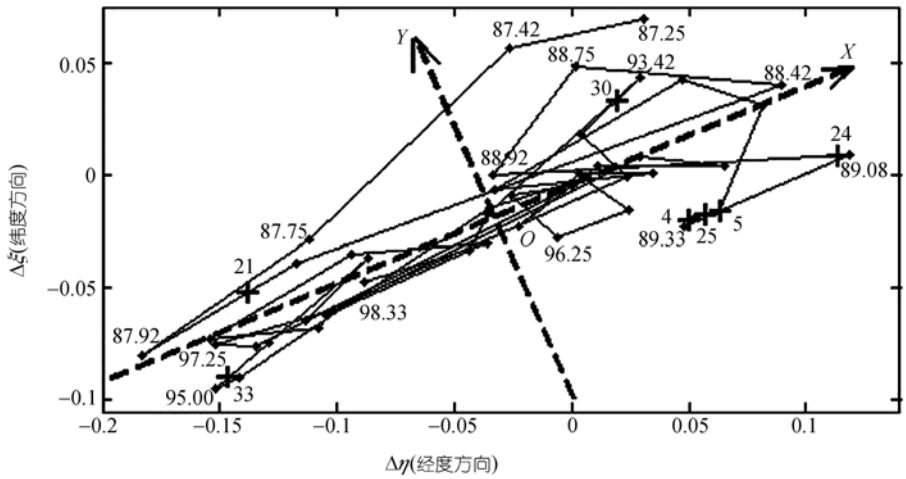

图 2 1987~1998 年间的唐山铅垂线变化(单位: 角秒)

共 46 测量点 (1987.25~1998.67), 图中 *X* 坐标轴(虚线)为 46 个点的回归直线; + 为地震(附以编号)

表 1 1987~1998 年间唐山邻近(M≥4.0)及周围地区(M≥4.4)的 38 次地震

地震序号	发生时间(历元)	东经/(°)	北纬/(°)	深度/km	震级 Mb 或 ML	离唐山的距离/(°)
唐山邻近地震: 1~20; 震级≥Mb 4.0; 离唐山的距离≤1.5°						
1	1988.7.24(88.56)	118.1	39.5	1	Mb 4.0	0.5
2	1988.7.26 (88.57)	118.1	39.4	1	Mb 4.1	0.5
3	**1988.8.3 (88.59)**	119.9	39.6	1	**Mb 4.3**	0.5
4	**1989.6.18 (89.46)**	118.5	39.6	9	**Mb 4.1**	0.1
5	**1989.12.24(89.98)**	119.0	40.2	1	**Mb 4.5**	0.6
6	1990.4.20 (90.30)	118.8	39.6	1	Mb 4.4	0.2
7	1990.7.3 (90.50)	118.6	39.7	7	Mb 4.0	0
8	**1990.7.23 (90.56)**	118.5	39.8	2	**Mb 4.5**	0.1
9	1991.5.6 (91.35)	118.8	39.7	3	Mb 4.0	0.2
10	1991.5.9 (91.41)	118.4	39.6	1	Mb 4.6	0.2
11	**1991.5.29 (91.41)**	118.3	39.6	2	**Mb 4.9**	0.3
12	1991.7.11 (91.53)	118.4	39.7	1	Mb 4.5	0.2
13	1991.7.27 (91.57)	118.8	39.7	6	Mb 4.0	0.2
14	**1992.7.21 (92.55)**	117.9	39.2	3	**Mb 5.5**	0.9
15	1993.2.3 (93.09)	118.6	39.8	1	Mb 4.8	0.1
16	**1993.11.17 (93.88)**	117.5	39.5	2	**Mb 4.0**	1.1
17	1995.9.19 (95.72)	118.4	39.6	9	Mb 4.0	0.2
18	**1995.10.5 (95.76)**	118.5	39.7	2	**Mb 5.0**	0.1
19	1998.4.14 (98.28)	118.5	39.6	2	Mb 4.5	0.1
20	**1998.4.15 (98.29)**	118.9	39.6	2	**Mb 4.6**	0.3
唐山周围地震: 21~38; 震级 ≥ ML 4.4; 离唐山的距离≥2.0°						
21	1988.2.25 (88.15)	122.5	42.4	26	ML 5.0	4.7
22	1988.7.23 (88.56)	113.9	40.1	10	ML 4.7	4.7
23	1988.9.2 (88.67)	122.4	40.8	9	ML 4.6	4.0
24	1989.1.12 (89.03)	122.5	40.5	27	ML 4.7	4.0
25	1989.10.18 (89.80)	113.9	39.9	7	ML 5.9	4.7
26	1990.7.21 (90.56)	115.9	40.6	12	ML 5.0	2.8
27	1991.1.28 (91.08)	112.7	38.5	33	ML 5.4	6.0
28	1991.3.25 (91.23)	113.9	39.9	11	ML 5.8	4.7
29	1991.9.30 (91.75)	112.5	43.1	20	ML 5.6	7.0
30	1993.4.18 (93.30)	123.4	41.3	21	ML 4.4	5.1
31	1993.12.30 (94.00)	112.8	38.2	11	ML 4.7	6.0
32	1994.9.12 (94.70)	122.1	40.2	24	ML 4.5	3.5
33	1994.10.22 (94.81)	120.4	41.7	33	ML 4.6	2.7
34	1995.4.15 (95.29)	122.5	40.9	29	ML 4.8	4.1
35	1996.7.17 (96.54)	120.5	42.1	21	ML 4.6	3.1
36	1996.12.15 (96.96)	116.6	40.2	1	Mb 4.4	2.1
37	1997.9.18 (97.71)	121.3	38.0	15	ML 4.7	3.2
38	1998.1.10 (98.03)	114.5	41.1	15	ML 6.2	4.3

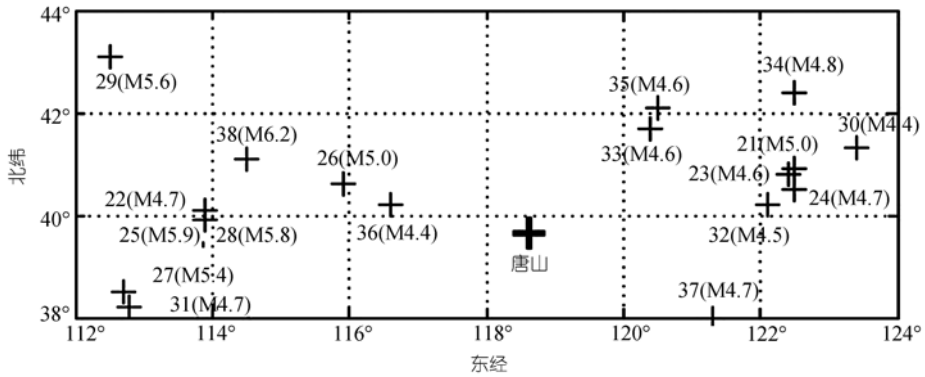

图 3　1987~1998 年间唐山周围地区 18 次地震(ML≥4.4): 21~38 次

3　1987~1998 年间唐山铅垂线变化 PLV 与唐山邻近和周围地震的比较

将 1987~1998 年间唐山铅垂线变化 PLV 与唐山邻近或周围的地震相比较时发现一种有趣的现象, 即地震发生的时刻往往与唐山铅垂线变化出现拐点的时刻相关联. 图 2 标出了几个易以表示的例子, 如地震 21, 33, 30, 4, 25, 5, 和 24. 其他的地震, 则因图中线条过于密集而无法一一表示. 由于 1987~1998 年间唐山铅垂线变化 PLV 十分接近于它的回归直线, 实际上也可用 PLV 的主要分量, 即 PLV 在 *OX* 轴 (回归直线)上的坐标 *X*, 来与地震进行比较, 即图 4 所示: 纵轴是唐山铅垂线变化 PLV 的 *X* 坐标; 横轴是时间. 这样不仅可对全部地震一览无遗, 两者的关系仍很清楚. 不论是唐山邻近的地震还是周围地区的地震, 其发生的时间往往与 *X* 坐标到达极值的时间相符, 或相接近.

在图 4 中, 当地震发生的时间(如地震 20: 1998.4.15(98.29))与测点相应的时间(测点 45: 98.33)足够接近时, 两者在图中的表示是重合的; 当地震发生的时间(如地震 21: 1988.2.25(88.15))明显偏离邻近测点的时间时, 地震的符号(*)则以直线内插的方法表示在 2 个邻近测点(测点 4: 87.92; 测点 5: 88.25)之间(图 4).

应该提到, 图 4 所示 PLV 时间序列的时间分辨率是有限的. 能达到这样的符合程度更说明了两者之间关联是十分明确的.

4　讨论

(1) 上述回归分析得到剩余标准差, s = 0.024″, 它是评价唐山铅垂线变化PLV测量结果可信性的一个依据. 如果唐山PLV确实是在*X*轴上的一种直线运动, 即 46 个点的*Y*坐标全部等于 0, 那么所得PLV点在南北方向上的测量中误差M(Δξ)就是±0.024″本身; 但现在实际的PLV只是近似于其回归直线, Y值虽小却不会全部为 0, 在这种情况下实际的测量中误差M(Δξ)应小于这个值(±0.024″). 在上述的回归分析中虽然没有能直接给出PLV测量点在东西方向上的测量中误差M(Δη), 据信其会优于南北方向上的M(Δξ). 因为在以往的研究中已经证明, 在测量北京-唐山重力测量网内一点的PLV时, 由于网的东西跨度要远大于南北向的跨度, 东西向的测量精度一般将显著优于南北向上的 [23,28]. 现在铅垂线的变化量达到 0.2″~0.3″, 大了一个量级, 图 2 和 4 所示的结果是可信的.

(2) 1987~1998 年间唐山铅垂线变化是如此逼近其回归直线, 使得我们有可能以其 *X* 坐标的变化来代替铅垂线的变化, 进而与地震的发生作比较. 图 4 表明, 两者之间明显关联, 即 *X* 坐标开始发生反向变化的时刻, 或者说唐山铅垂线开始发生反向变化的时刻, 往往有 $M \geq 4.0$, $M \geq 4.4$ 的地震在唐山邻近, 或其周围, 发生. 在这 12 年中, X 坐标的变化有 16 个极值点, 其中有 14 次发生了地震, 比率几近 90%. 因此, 通过实时精确跟踪唐山铅垂线的变化, 可望对唐山及其周围地震提供有用的信息.

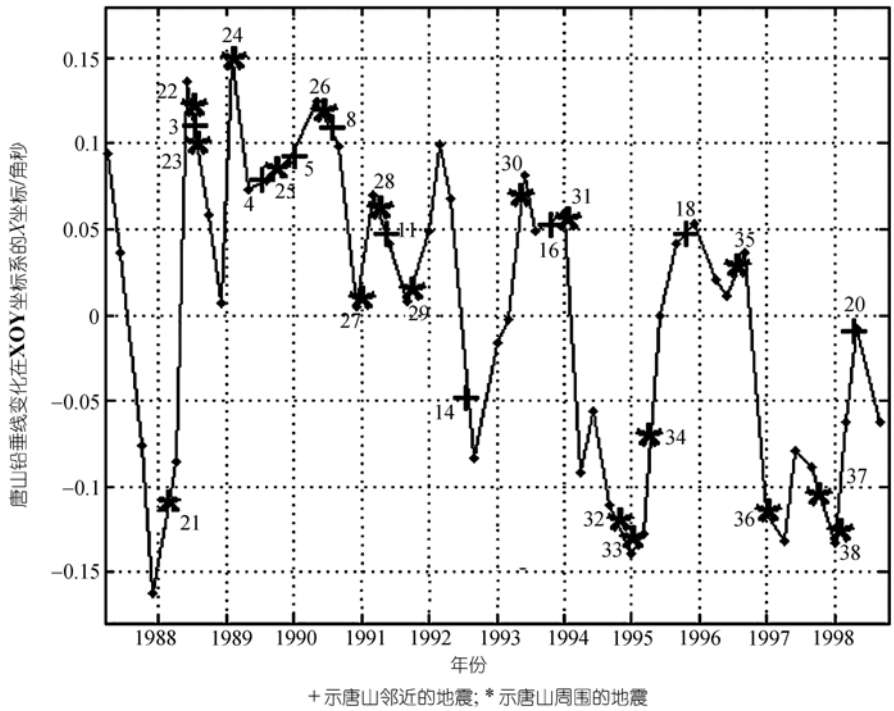

图 4 1987~1998 年间唐山铅垂线变化的 *X* 坐标与地震发生的对照

(3) 上述唐山铅垂线变化与地震关联的发现, 也许能视作Chen等 [29]提出的"物质迁移"说的一个佐证. 地震发生前后地下大量物质的迁移会引起唐山地区局部水准面的变化, 其倾斜变化的成分, 即水准面一点法线的变化, 就是铅垂线的变化. 上述两者相关联的发现, 实质上是从一个侧面描述了地震发生前后地下物质的迁移过程.

(4) 本文发现铅垂线变化与地震发生相关联的现象, 在中国滇西地区也有相似的案例. 这说明这种现象很可能有其普遍性. 进一步研究这个问题, 不仅是可能的, 也是必要的.

5 结论

中国北京-唐山重力网的重复重力测量资料可以被用来测量网内一点铅垂线的变化. 1987~1998 年间唐山铅垂线变化的量级为 0.2″~0.3″, 而其测量中误差为±0.02″~±0.03″. 唐山铅垂线的变化与其附近或周围地震的发生相关联, 即地震发生的时间往往与唐山铅垂线开始反向变化的时间相符合. 粗略地讲, 1987~1998 年间唐山铅垂线的变化还可以被近似地视作在一个固定方向上的来回摆动, 该方向的方位角等于 66.5°. 唐山铅垂线变化与其周围地震发生之间存在着如此明确的关系, 同时也证明了在中国华北地区确实存在着非潮汐的铅垂线变化. 类似的现象也已在中国的滇西地区发现. 当然, 对非潮汐铅垂线变化问题的完整认识还有待于今后进一步的研究工作.

致谢 作者对廖新浩教授给予的支持与帮助, 叶叔华和陈云泰院士对此项研究给予的关心、支持与指导, 特此一并致谢.

参考文献

1 Kimura C. A change of vertical amounting to 0.18″ must have taken place at Mizusawa. Bull Geod ANNEE, 1925. 535—537
2 Melchior P. The Tides of Planet Earth. Oxford: Pergamon, 1978
3 Cecchini G. Report: variation de la verticale locale. Bull Geod, 1955, 38: 3—4
4 IAU. Application of optical astrometry time and latitude programs. Trans Int Astron Union, 1991, XXIB: 209
5 IAG. Structure of the International Association of Geodesy for the period 1995~1999. J Geodesy (Historical Archive), 1996, 70 (12): 906—908[DOI]
6 Li Z X. Measurements of interannual variation of the vertical at Jozefoslaw by astrometric and gravimetric observations. Astron Astrophys Suppl, 1998, 129: 353—355[DOI]
7 Barlik M, Rogowski J B. Variations of the plumb-line direction obtained from astronomical and gravimetric observations. Prace Nauk Politech Warsz, 1989, 33: 19—101
8 Barlik M. Variations of the plumb-line at Jozefoslaw from gravimetric determination in 1995. Latitude Circular 118. Warsaw University of Technology, 1996. 5—6
9 李致森, 张国栋, 张焕志, 等. 天文测时测纬的一段时间异常与台站附近强震的对应关系. 地球物理学报, 1978, 21(4): 278—290
10 韩延本, 胡辉, 杜红荣. 禄功 6.3 级地震前云南天文台时纬残差的初步分析. 科学通报, 1986, 31(16): 1244—1246
11 胡辉, 李永生, 王锐, 等. 云南天文台时纬残差与昆明周围强震. 地球物理学报, 1988, 31(4): 483—485
12 廖德春, 郑大卫. 江苏太仓五级地震与上海天文台测时异常. 科学通报, 1990, 35(23): 1838
13 田静, 曾志坊. 天文时纬异常与阿根廷 San Juan 地区的地震活动. 科学通报, 1997, 42(19): 2106—2108
14 张国栋, 韩延本, 赵复恒. 从天文观测提取地震前兆信息. 地震学报, 2002, 24(1): 75—81
15 罗葆荣. 云南天文地震学的研究进展. 云南天文台台刊, 2002, (1): 47—53
16 The inca Consortium. The Hipparcos Input Catalogue. Star Catalog, Esa sp-1136, European space agency, March Noordwijk: ESA Publication Division, 1992
17 Li Z X. Non-tidal vertical variations and the past star catalogs. In: Jin W J, Platais I, Perryman A C, eds. A Giant Step: From milli- to micro-arcsecond Astrometry. Proceeding IAU Symposium No. 248, 2007 Oct 15~19, Shanghai. Springer, 2008. 108—109
18 陈运泰, 刘克人, 郑金涵, 等. 局部重力场变化与地震发生的关系合作研究课题的回顾. 理论与应用地球物理进展. 北京: 气象出版社, 2002. 40—47
19 顾功叙, Kuo J T, 刘克人, 等. 中国京津唐张地区时间上连续的重力变化与地震的孕育和发生. 科学通报, 1997, 42(18): 1919—1930
20 Kuo J T, Sun Y F. Modeling gravity variations caused by dilatancies. Tectonophysics, 1993, 227: 127[DOI]
21 Kuo J T, Zheng J H, Song S H, et al. Determination of earthquake epicentroids by inversion of gravity variation data in the BTTZ region, China. Tectonophysics, 1999, 312: 267—281[DOI]
22 Heiskanen W A, Moritz H. Physical Geodesy. London: W H Freeman And Company, 1967
23 Li Z X, Li H, Li Y F, et al. Non-tidal variations in the deflection of the vertical at Beijing Observatory. J Geodesy, 2005, 78: 588—593[DOI]
24 李辉, 傅广裕, 李正心. 重复重力测量结果计算垂线偏差的时间变化. 地震学报, 2001, 23(1): 61—66
25 李辉, 刘冬至, 刘绍府, 等. 地震重力监测网统一平差模型的建立. 地壳型变与地震, 1991, 11(增刊): 68—74
26 刘冬至, 李辉, 刘绍府. 重力测量资料的处理系统-LGADJ. 地震预报方法实用化研究文集 (形变·重力·应变专集). 北京: 地震出版社, 1991. 339—350
27 李辉, 傅广裕, 孙少安, 等. 滇西地区重力场动态变化计算. 地壳型变与地震, 2000, 20(1): 60—66
28 李月峰, 丁行斌. 用重复重力测量测定垂线偏差时的精度. 天文学报, 2005, 46(4): 460—473
29 Chen Y T, Gu H D, Lu Z X. Variations of gravity before and after the Haicheng earthquake, 1975 and the Tangshan earthquake, 1976. Phys. Earth Planet Int, 1979, 18(4): 330—338[DOI]