

上海城区地面沉降 及其对地下水采灌量的响应

张建伟 胡克 岳玮 刘宝林 王建 高攀

- (1. 青岛大学环境科学系, 山东青岛 266071;
2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;
3. 山东省高密市环坑保护局, 山东高密 261500;
4. 青岛地质工程勘察院, 山东青岛 266100)

摘要: 上海城区地面沉降主要是由超采地下水、松散沉积地层压实等因素共同作用导致的, 并引发多种次生灾害。F4 分层标监测数据指示的地面沉降情况, 显示上海城区地面沉降表现为总体具有非线性变化的规律, 特别是 1980 年代以来, 表现出垂向逐渐增大的特点, 在空间上也不断扩展, 直至 2001 年才始有缓和的趋势。在不同时段, 随地下水开采 t 及开采层次的变化, 上海城区地面沉降表现出不同的特征。结合 1990-2009 年 20 年内第四含水层地下水采灌量数据, 得出地面沉降对地下水采灌量的响应关系为: 地下水开采量增加, 地层沉降量增大; 地下水开采量减少, 地层沉降量减小, 但地面沉降相对于地下水开采具有滞后性; 随着逐年的回灌, 地层沉降量减小, 且地下水回灌效果与回灌层位有直接关系。

关键词: 地面沉降; 分层标; 地下水; 采灌量; 响应关系

中图分类号: P641.69 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8227(2016)04-0567-06

DOI: 10.11870/cjlyzyhj201604005

地面沉降是人类工程经济活动影响下, 由于松散地层固结压缩, 导致地面标高降低的一种局部的下降运动(或工程地质现象), 是一种不可补偿的永久性环境和资源损失, 对城市建设和人民生活构成很大威胁。在城市化进程中, 地面沉降成为制约社会经济可持续发展的重要地质灾害之一; 世界上有 60 多个国家和地区发生过地面沉降, 最早的文献记录为 1891 年墨西哥城地面沉降现象, 但当时未引起重视。

1956 年, 美国学者 J. F. Poland 论述了由于开采地下水引起的地面沉降现象; 而日本资源调查会于 1964 年也指出地面沉降受到强烈抽取地下水的影响。

早在 2001 年, 我国已有近百个城市出现地面沉降。始于 20 世纪 20 年代的上海城区地面沉降, 是我国发生地面沉降现象最早、影响最大、危害最深的城市; 至 60 年代灾害已十分严重, 90 年代初发展成为长江三角洲地面沉降重灾区。

1 研究区

1.1 地理条件

上海地处东经 $120^{\circ} 51' - 122^{\circ} 12'$ 、北纬 $30^{\circ} 40' - 31^{\circ} 53'$, 东临东海, 南临杭州湾, 西与江苏、浙江接壤, 北接长江入海口, 系江、河、湖、海动力作用条件下形成的冲积平原, 尤以长江泥沙堆积为主。除西南部有少量基岩残丘外, 全为地势较低的平原, 平均海拔高度约 4m, 是长江三角洲冲积平原的一部分。

1.2 地层

地表覆盖较厚的松散沉积物, 厚度约 200-350 m。受地质历史时期海平面升降变化影响, 海陆变迁频繁, 第四纪地层在垂向上具有砂性土与粘性土交互的沉积韵律。埋深 150 m 以下, 为欠固结—正常固结的浅海—滨海相和河流三角洲相的粘性土与砂层; 150m 以上, 由正常

固结-超固结的河流相砂层和湖相杂色粘土层组成(图 1)。

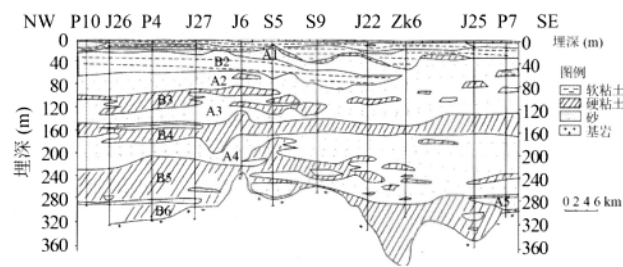


图 1 上海城区水文地质剖面图^[10]

Fig.1 Hydrogeological Section Map of Shanghai City

1.3 含水层

松散沉积物根据岩性不同，划分为含水层和弱透水层。从上至下依次为表土层(B0)、潜水含水层(A0)、第一弱透水层(B1)、第一承压含水层(A1)、第二弱透水层(B2)、第二承压含水层(A2)、第三弱透水层(B3)、第三承压含水层(A3)、第四弱透水层(B4)、第四承压含水层(A4)、第五弱透水层(B5)、第五承压含水层(A5)、第六弱透水层(B6)；局部地区含水层、弱透水层缺失。

2 上海地面沉降

2.1 地面沉降的发展演化

上海城区利用深井抽取地下水的历史可追溯至 1860 年，但直到 1921 年才由水准测量发现地面沉降。1952 年，上海港务局勘察得出了 1948-1951 年黄浦江岸的大地沉降数据；1958 年大跃进开始后，工业用地下水量剧增，地面沉降加剧，引起政府部门的重视；1961 年，上海多部门和科研单位共同组成“上海地面沉降问题研究小组”，归纳了地下水开采等地面沉降的十大影响因素，并指出超采地下水是上海地面沉降的主要原因。

自 1962 年起，上海开始建立以分层标为主的地面沉降测量网络和以采灌井为主的地下水动态监测网络，研究结果表明，上海地面沉降主要是由于地下水超采导致固结程度弱的松散沉积物土层发生压实变形而产生。

在查清地面沉降主要原因后，1965 年开始采取控沉措施，限制地下水开采量，地下水位普遍回升，地面沉降得到有效遏制；1990 年后，地下水开采量再次增加，地面沉降又呈增长趋势。

2.2 地面沉降的危害

上海地面沉降引发的地质灾害现象主要有潮水上岸、暴雨地面积水、桥下通航受阻和地貌形态改变等，以及码头受淹、深井管上升、水准点失稳、河床下沉、承压含水层地下水储量永久性减少。

2.3 分层标数据

设于上海劳动公园的 F4 分层标可有效指示城区地面沉降数据；分层标是高精度监测地面垂直形变量的监测技术，其测量精度可达 0.01-0.10m，虽然具有成本亮、井程复杂等困难，但其数据具有高度灵敏性。F4 分层标从 1964 年开始测量，每月的今 15、25 日各测一次标位，每年 12 个月共测 36 次数据。利用这 36 个数据加和得到某层位在一年内的沉降量，用以判断地面沉降量，然后继续把每年的沉降量加和求出累计沉降量，掌握地面沉降的总体情况。

F4 分层标分成如下监汉组层位：B0(1.00-3.58 m), A0(3.58-6.90 m), B1(6.90-29.61 m)，

A1(29.61-47.95 m), B2(47.95-88.39 m), A2、B3、A3(88.39-153.01 m), B4(153.01-173.72 m), A4(173.72-239.10m), B5、A5(239.10-332.95m)。各层位的年均沉降量统计见表 1。

表 1 各层位不同时间段的年均沉降量统计表

Tab.1 Annual Subsidence in Different Periods of Each Layer

各层年均 沉降量	1964~1965	1966~1989	1990~2004	2005~2010
B0层	-0.58	-0.47	0.34	0.52
A0层	0.06	0.33	-1.26	-2.25
B1层	-2.98	-2.16	-2.62	-7.11
A1层	-2.49	-0.65	-0.57	-0.57
B2层	-11.77	-0.68	-1.48	-0.51
A2、B3、A3层	3.63	0.30	-0.48	0.23
B4层	0.27	-0.23	-1.41	0.18
A4层	0.00	-0.12	-9.39	-3.11
B5、A5层	0.00	-0.22	1.32	0.22

注：表中数值单位mm；负值表示土层压缩，正值表示土层回弹

2.4 地面沉降特征

上海城区地面沉降表现出来的发展变化趋势，总体具有非线性变化的规律，特别是 1980 年代以来，表现出逐渐增大的特点，直至 2001 年才始有缓和的趋势。随着地面沉降速率的增大，地面沉降中心在空间上不断地扩展；并且随着地面沉降速率的增大，城区地面沉降在空间上的差异性更加明显，特别是在线形市政设施及城市生命线工程近侧，表现尤为突出，已形成多个沉降带和沉降发育中心。

1996-2000 年，中心城区年平均地面沉降速率显著增大，由 1991-1995 年的 11.9 mm/a，增大至 20.3 mm/a；该时段，黄浦江沿线沉降区明显增大，且随着浦东新区的开发建设，黄浦江东侧地面沉降增大趋势明显。

2001-2005 年，中心城区平均地面沉降速率有所下降，为 15.3 mm/a，较 1996-2000 年阶段减少 5mm/a；原地面沉降区的影响范围进一步扩大，已与北部沉降区连成一体，但年沉降速率较 1996-2000 年有明显下降，最大年均沉降约为 30 mm/a；黄浦江沿线地面沉降速率降为 20mm/a 左右，且差异沉降较明显，浦西侧地面沉降明显大于浦东侧地面沉降。

3 对地下水采灌量的响应

3.1 地下水开采的影响

在不同时段，由于地下水开采量及开采层次的变化，上海城区地面沉降表现出不同的特征，这表明，上海地面沉降受到地下水开采的影响。

1972 年以前，开采量的 80.5%都来自第二承压含水层（A2）和第三承压含水层（A3），在集中开采区出现大面积的地面沉降，对地面沉降的研究主要集中于埋深 70m 以内的土层变形，对其中的承压含水层的变形都作为弹性处理。此后，为控制地面沉降量，进行了开采层次的调整，限制 A2、A3 层的开采量，增加第四承压含水层（A4）、第五承压含水层（A5）的开采量；至 1985 年，该两个含水层的抽水量占总开采量的 71.4%，但总开采量不大。1990 年以后，总开采量再次增加，使得 A4、A5 层的水头大幅下降，而且承压含水层（特别是 A4 层）表现出明显的变形特性。近几年，虽然地下水位的下陷趋势得到遏制，甚至有少量回升，但地面沉降量仍在增长，上海地面沉降问题变得更加复杂。

3.2 响应关系

根据上海市地质调查院提供的 1964—2014 年上海城区地下水开采量、回灌量数据，结合表 1，分析地面沉降与地下水采灌量的响应关系，可为控制地面沉降有所帮助。

数据比较发现, 1964、1965 年, 第二弱透水层 (B2) 沉降 23.54 mm, 表示的不仅是该两年内第二含水层 (A2)、第三含水层 (A3) 大量开采地下水, 还包括此前多年开采地下水的沉降滞后效应。1966-1989 年, 第二含水层 (A2)、第三含水层 (A3) 和第四含水层 (A4) 交替混合开采, 地面沉降受地下水开采制约的特征不明显。1990-2009 年间, 主要开采第四含水层 (A4), 主要沉降层也是 A4 层, 地面沉降受地下水开采制约的特征十分显著。2010 年后, 实施各种保护措施, 地面沉降、地下水开采均趋于稳定。

(1) 1990-2014 年 A4 层年沉降量与地下水开采量的关系曲线显示 (图 2), 二者均呈一个波峰状, 且具有一致的波动趋势; 即随着地下水开采量的增加, 地层沉降量增大; 随着地下水开采量的减少, 地层沉降量减小。但开采量峰值出现在 1994 年, 沉降量峰值出现在 1997 年, 说明地面沉降相对于地下水开采具有滞后性; 即不是在地下水开采当年立即发生地层沉降变化, 地层的沉降是一个缓变的过程, 是在地下水开采几年后逐渐沉降的。同时, 也说明地面沉降还受地层结构、岩土体工程地质特性、地面高层建筑等因素共同作用。

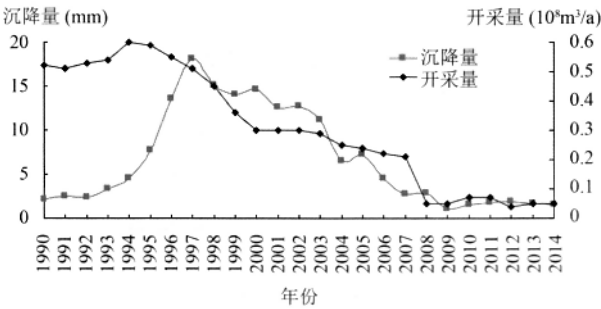


图 2 第四含水层年沉降量与地下水开采量关系

Fig.2 Relationship Between Annual Subsidence and Groundwater Exploitation of the Fourth Aquifer

(2) 1990-2014 年 A4 层年沉降量与地下水回灌量的关系曲线显示 (图 3), 随着逐年的回灌, 地层沉降量减小。但是, 地下水回灌与回灌的地下水含水层位有直接关系, 如回灌层并非主要开采层, 则对开采含水层恢复的作用有限, 地面沉降的响应较弱; 另外, 回灌量远小于开采量, 因此, 地下水开采量对地层沉降的制约更强。而地下水年开采量减去地下水年回灌量, 得出的地下水净开采量对于地层沉降的分析将更有意义。

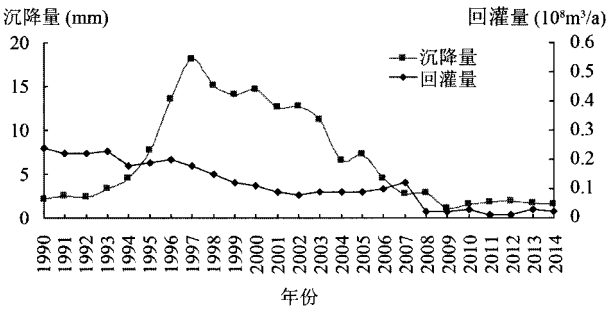


图 3 第四含水层年沉降量与地下水回灌量关系

Fig.3 Relationship Between Annual Subsidence and Groundwater Reinjection of the Fourth Aquifer

(3) 1990-2014 年 A4 层年沉降量与地下水净开采量的关系曲线显示 (图 4), 二者均呈一个波峰状, 且与图 2 相比具有更一致的波动趋势; 随着地下水净开采量的增加, 地层沉降量增大; 随着地下水净开采量的减少, 地层沉降量减小。1990-1994 年间, 沉降量和净开采量均逐年增长; 1994 年为净开采量峰值, 而沉降量峰值出现在 1997 年, 说明了地层沉降的滞后性。1994-2000 年间, 地下水净开采量迅速减少; 2000-2009 年, 地下水净开采量相对于 1994-2000 年, 减少趋势渐缓; 2010-2014 年地下水净开采量基本稳定而微有起伏, 地面沉降趋于稳定。而 1997-2009 年间的地层沉降量呈近于同一速率的减小, 这一方面说明地层沉降的滞后性使沉降逐年累加, 另一方面也说明沉降受地层结构、岩土体工程地质特性、地面高层建筑等因素的

共同作用；1997 年后的沉降趋势、开采与回灌量趋势，也说明了上海城区实施限制开采量、每年回灌地下水等控制地面沉降措施的效果。

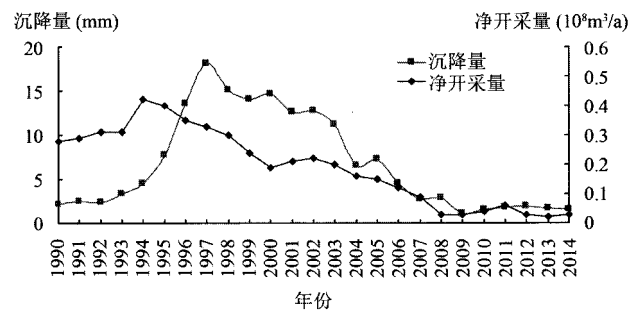


图 4 第四含水层年沉降量与地下水净开采量关系

Fig.4 Relationship Between Annual Subsidence and Groundwater Net Exploitation of the Fourth Aquifer

3.3 地层压实

由上可知，上海城区的地面沉降受超采地下水等外在因素诱发，而可压缩土层也是引起地面沉降的重要内在因素。

统计发现，承压含水层地层压实作用明显，其变形速率自 1991 年开始呈大幅增加趋势，沉降速率于 1997 年达到最大值 17.8mm/a；A4 层压实沉降是主要的影响因素，1990 年代以来，A4 层沉降量大幅增长，平均沉降速率为 6.2-11.2 mm/a。

4 地面沉降控制措施

随着近年来实施限制地下水开采、采取人工回灌、调整地下水开采层、制订地下水采灌规划方案等措施，使地下水位普遍大幅回升，城区地面沉降得到初步控制。

5 结论

(1)上海城区地面沉降主要是由于超采地下水等外在因素诱发，导致内在固结程度弱的松散沉积物可压缩土层发生压实变形而产生，并由此引发多种地质灾害。分层标显示上海城区地面沉降总体具有非线性变化的规律，特别是 1980 年代以来，表现出逐渐增大的特点，在空间上不断地扩展，直至 2001 年才始有缓和的趋势。

(2)1990-2014 年 A4 层年沉降量与地下水采灌量对比显示：随着地下水开采量的增加，地层沉降量增大，随着地下水开采量的减少，地层沉降量减小，但地面沉降相对于地下水开采具有滞后性；随着逐年的回灌，地层沉降量减小，且地下水回灌效果与回灌层位有直接关系；2010 年后，地面沉降、地下水开采均趋于稳定。