2005 年 2 月
26 卷 1 期:67-70

地 球 学 报
ACTA GEOSCIENTICA SINICA

Feb. 2005
26(1):67-70

西安市地面沉降时空演化特征及机理研究

祝意青　王庆良　徐云马　操启明

中国地震局第二监测中心,陕西 西安,710054

摘　要　本文根据多年来的垂直形变资料,系统而深入地研究地面垂直形变的演化特征及其规律,并结合地下水活动和地面沉降分层标的监测资料,分析地面沉降成因。西安地区由于过量开采地下水,引起地面急剧沉降。

关键词　垂直形变　演化　分层标志　成因机制

A Study of the Space-Time Change Characteristics of Ground Subsidence in Xi′an and Their Mechanism

ZHU Yiqing　WANG Qingliang　XU Yunma　CAO Qiming

No. 2 Monitoring Center, CSB, Xi′an, Shaanxi, 710054

Abstract　Based on multi-period observation data of vertical deformation, the authors have systematically analyzed and thoroughly studied the evolutionary characteristics and stratification criteria of ground vertical deformation in Xi′an. The reason for the ground subsidence is also analyzed by integrating the observation data of groundwater activity and slice indicators of ground subsidence. The main reason for the ground subsidence is the excessive exploitation of underground water.

Key words　vertical deformation　evolution　stratification criteria　genetic mechanism

自 1970 年以来,西安地面沉降愈演愈烈,为了研究西安市的地面变形,中国地震局第二监测中心自 1986 年起在西安城区及其附近布设了 130 多平方公里的水准测线,以监视西安市区的区域形变场变化。1987 年,在市区的各裂缝带上布设了大量的跨裂缝短水准和水平测距小网,以监视裂缝活动的三维地形变。1992 年,在水准监测网上进行流动重力网的布设和监测,了解区域重力场的变化。本文分析了西安市 1986 年以来的地面沉降情况,研究垂直形变场时空演化特征及其成因分析,从而为城市减灾服务。

1　测量概况及数据处理

1986 年前,西安市区形变监测仅是关中地区形变监测网的一小部分。由于点距大,密度小,难以全面反映西安市地面变形的概貌。1986 年为监测西安地面沉降和地裂缝活动建立了专用形变网,该网覆盖了西安市地面主要变形区,并根据复测结果不断对其进行扩大和完善。并以南北向横穿地裂缝的测线为骨干,由上百个水准点组成十余个水准环。网布设时不仅考虑了地裂缝的展布,还考虑了地形地貌特征,以往资料反映的沉降中心位置等。

在数据处理方面,采用了动态拟稳平差方法。其特点是把测网中所有的点都看作是动态的。在选择拟稳点时,考虑了以下因素:①距地裂缝较远;②远离地下水漏斗;③拟稳点之间形变差异较小,且尽可能处于同一相对稳定的地貌单元中;④反映的形变场合理,即所反映的形变速率零曲线的位置应成为形变场特征的明显分界线。各期的平差精度见表 1。二个时段的年速率中误差在 1.66～1.88 mm 之间,说明观测资料可靠。

表 1　西安水准测量精度

Table 1　Level surveying precision in Xi′an

时段	点数	环线数	速率中误差 /mm·a^{-1}
第一时段 (1986～1988 年)	85	10	1.88
第二时段 (1988～1991 年)	97	13	1.66

本文为国家自然科学基金项目(编号:49702040)资助。
改回日期:2003-3-14　责任编辑:宫月萱。
第一作者:祝意青,1962 年生,高级工程师,长期从事大地测量与重力学方面的监测与研究;E-mail:zhuyiqing@163.com。
万方数据

2 西安市地面垂直形变场演化特征

2.1 区域形变场的时空动态演化特征

西安市地面变形是小范围的地形变，其变化有其特殊成因(张四新等，1997)。1986 年前的西安地区垂直形变场有关文献(李永善等，1992)已作过论述。本文通过分析 1986 年后为西安地面沉降进行监测的垂直形变变化，在研究各期垂直形变速率图(图 1，图 2)后，提出：

(1)西安地区垂直形变空间分布比较有规律，均表现为大范围的地面下沉变化。垂直变化等值线总的走向为 WEE 向与西安地裂缝走向基本一致。

(2)地面沉降表现为市区西北稳定，东南活跃。沉降速率由北向南逐渐增加，二府庄—铁炉庙一带为沉降带的谷底。形变总体趋势大致呈由 WN 向 ES 倾斜的斜面。这种形变的倾斜方向与地形的南高北低的趋势相反。

(3)地面沉降中有多个沉降中心出现，沉降中心伴生的沉降区呈椭圆形，其长轴方向为 WE 向带状展布。两期沉降中心的速率变化有的增大、有的减小。西北工业大学、陕西省卫生学校、李家村沉降中心的沉降速率减小，沙坡、小寨-八里村沉降中心的沉降速率增大。沉降中心速率的增减与该处地面建设及人为活动有关。

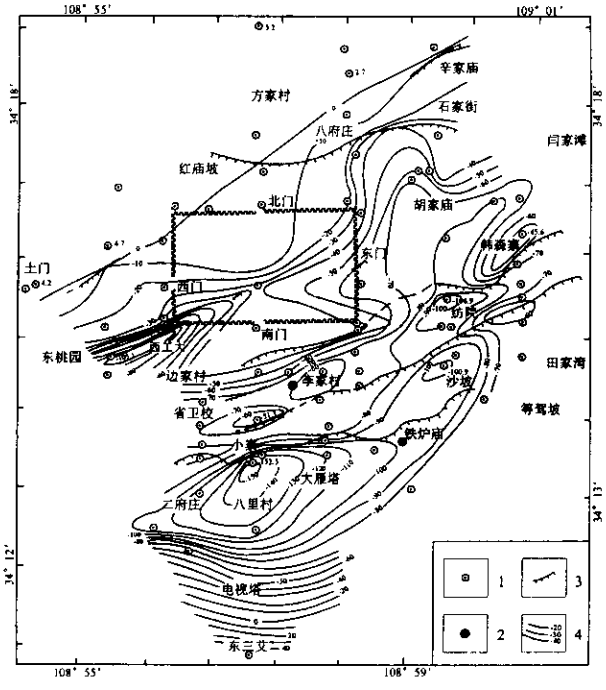

图 1 西安地面垂直形变速率图(1986～1988)

Fig. 1 Vertical deformation velocity graph in Xi′an area(1986～1988)

1-普通水准点；2-基本水准点；3-地裂缝；4-形变速率等值线

1-ordinary level mark；2-basic level mark；3-ground fissure；4-deformation velocity equivalence line

万方数据

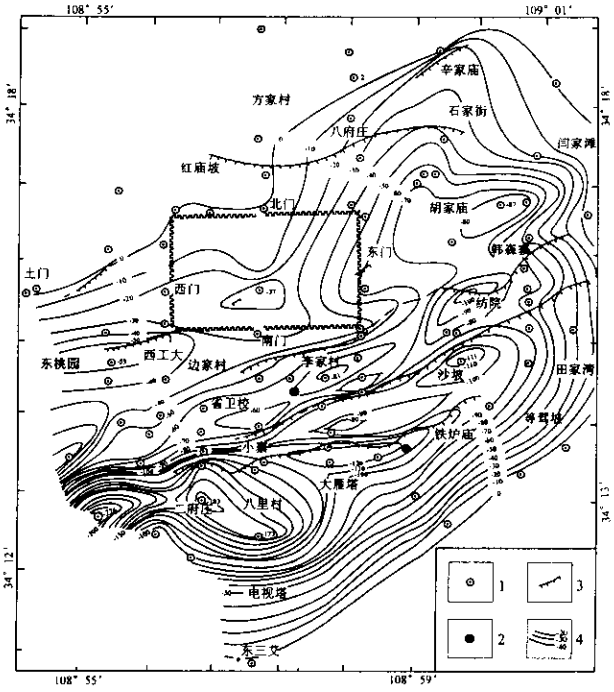

图 2 西安地面垂直形变速率图(1988～1991)

Fig. 2 Vertical deformation velocity graph in Xi′an area(1988～1991)

1-普通水准点；2-基本水准点；3-地裂缝；4-形变速率等值线

1-ordinary level mark；2-basic level mark；3-ground fissure；4-deformation velocity equivalence line

(4)西安地面沉降的空间特点是，总体沉降可分为 2 个形变槽，胡家庙-西北工业大学形变槽和小寨-纺院形变槽。前者又可分为南北两个次级形变槽，后者可分作纺院-李家村、沙坡-鲁家村、小寨等 3 个次级形变槽。形变槽间为形变梁所分隔，计有南门-韩森寨、草场坡-冶院东-秦川厂及陕西省委-青龙寺形变梁。

(5)西安地面沉降的另一显著特点是形变陡梯度的出现。这些形变陡梯度带均分布在形变梁南槽北之相接部位。西安地面沉降中心形变梁与槽的分布与地貌关系密切。形变梁与槽往往对应了地形中心的梁与洼(张家明，1990)。

(6)两期地面沉降范围基本一致，形态相似。

(7)沙井村至二府庄一带是西安南郊高新科技开发区，该地区沉降速率为全区之冠，沉降中心年速率达 226 mm/a(图 2)。

2.2 南郊小寨沉降中心垂直变化时序特征

西安地面沉降的累计量已相当可观。表 2 列出小寨沉降中心自 1972 年 10 月以来的形变累计量。研究中对西安市南郊的小寨沉降中心自 1972 年以来进行了长期观测，小寨沉降中心自 1972～2002 年累计下沉量达2497mm。图3是相应的累计下沉

表 2　1972 年以来的形变累计量

Table 2　Deformation cumulative value since 1972

t/年.月	累计量/mm	t/年.月	累计量/mm
1976.04	93	1991.08	1673
1978.04	182	1992.11	1804
1980.04	364	1994.11	2070
1984.03	804	1996.07	2229
1986.11	1035	1998.07	2407
1987.08	1135	2000.06	2459
1988.08	1288	2002.06	2497

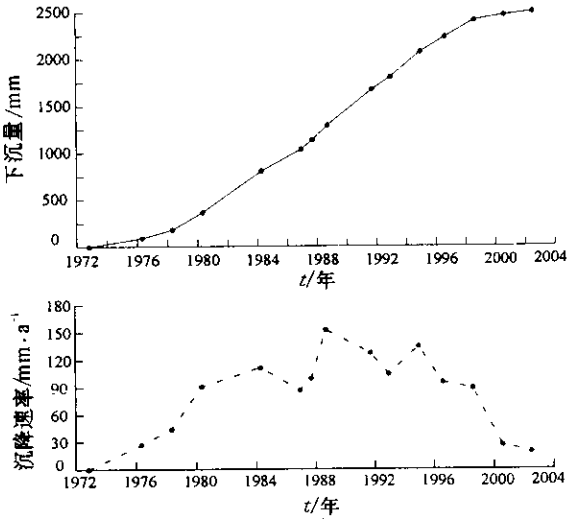

图 3　小寨地面沉降累计量和速率变化图

Fig. 3　Diagram of ground subsiding cumulate value and velocityvariation

量和沉降速率变化图。从图中可以看出，自 1972 年以来西安地区一直下沉变化，1996 年后变化速率稍有减缓，1998 年后明显减缓，2002 年沉降速率与 1976 年前基本一致，这与西安市引进黑河水工程有关。1996 年起西安市自备井承压水的开采量减少，1998 年严禁开采地下水，因此小寨沉降中心的地面沉降得到控制和逐渐停止。

3　西安地面变形与地下水活动的关系

3.1　地面沉降分层标监测资料分析

分层标是为了了解土层不同深度之间的动态变化量及各层标与地面之间的动态变化。这些数据为分析地裂缝成因、地下水开采与地面沉降之间的关系及地裂缝南北两侧深部土层垂直变化规律的研究及时提供了较精确的定量数据(表 3)。

(1)从表 3 可以看出，地面沉降主要是埋深 104～367 m 承压含水层释水压密造成的，其压密量占地面沉降量的 83.55%，而 104 m 以上及 367 m 以下地层压密量仅占地面沉降量的 16.45%。如果地面沉降是承压水与潜水和地表水共同作用的结果，假设潜水和地表水作用引起的沉降占 100 m 以上沉降量的一半(实际上还达不到这个数)，那么由于地下水潜水水位变动或地表积水浸透作用产生的沉降部分在总沉降中所占比例不到 10%。因此，西安地面沉降主要是过量抽取承压水所致。

(2)地面沉降的沉降量主要在 104～187 m 之间，其次是 187～367 m 之间，最后才是 104 m 以上，

表 3　西安地质技工学校分层标资料(1990.3～1995.12)分析结果(据高金川等，1999)

Table 3　Analyse result of stratifically marking datum in Xi'an geological artificer school (after Gao Jinchuan et al. 1999)

分层标深度/m	累计 沉降量/mm	累计 速率/mm·a⁻¹	分层 沉降量/mm	分层 占总量比例/%	分层 速率/mm·a⁻¹	分层标点名
浅部非开采段 0～104	629.91	130.42	89.94	14.30	18.62	S0、S2b
104～187	539.97	111.80	347.87	55.22	72.02	S2
承压水开采段 187～260	192.10	39.85	103.72	16.46	21.47	S3
260～367	88.38	18.30	74.82	11.87	15.49	S4
深部未开采段＞367	13.58	2.81	13.58	2.15	2.81	S1

其之间的比例是 4∶2∶1。这与西安抽取地下水的含水层结构相关，西安市抽取地下水主要在 100～200 m 之间，此含水层抽取的地下水最多，其次是 200～300 m 间抽水，100 m 以上抽取承压水较少。埋深 100～300 m 承压含水层是西安市承压水开采的主要取水段，由于多年超采，引起承压水位大幅度下降，在强大的附加应力作用下，含水系统释水压密，从而导致地面沉降。

(3)367 m 以下的分层标年速率为 2.8 mm/a，这与临潼-长安断裂和渭河断裂构造活动的速率基本一致(赵振才等，1989)。说明深部土层的地面沉降是由于区域构造活动所致。地表点相对深层基准标下降的年速率为 130.4 mm/a。西安地裂缝垂直形变图(1989～1991)显示该地区沉降年速率为 130 mm/a 左右，二者的变化一致。这表明深层基准标是稳定的，可以作为地面沉降监测的基准点。

3.2　地面沉降与承压水位下降关系

西安地面沉降与承压水位下降在时间上相对

万方数据

应,地面沉降区与深层承压水位降落漏斗范围一致,地面沉降中心也与水位降落中心相吻合。这些地区承压水开采井密集,开采强度大,同时是地面沉降显著地段(李永善等,1992;张家明,1990)。

4 西安市地面变形成因分析

地面沉降与深层地下水的超量开采密切相关,只要地下水位以下存在可压缩地层,由于孔隙水压力(对上覆地层的浮托力)降低,砂层的有效应力增加,孔隙度降低,砂层受到压密,即会引起地面变形。由于砂砾类岩土基本呈弹性变形,待空隙水压力恢复后,砂层基本能恢复原状。如果同样的压密发生在粘土层中,由于粘土释水压密时结构发生了不可逆转的变化,即使空隙水压力恢复,粘性土仍保持其压密状态,因粘性土是以塑性变形为主。西安地区第四纪地层厚度达 600～1 000 km 以上,其中 300 m 以上主要以粘性土为主(吴嘉毅等,1990),因此超量开采地下水容易引起地面下降。

(1)西安地面沉降与地下水位下降在时空上具有较好的对应性,它不仅表现在地面沉降中心与地下水下降漏斗在空间上之对应关系,还表现为地下水开采量与地面下沉量在时间上的对应关系,时空分布的一致性显示了它们成因上的密切联系。

(2)西安地面沉降与深层承压水开采量、承压水头下降呈正相关关系。西安城区及近郊自来水开采井主要采自地下 100～300 m 的深层孔隙承压水。此含水层由冲积湖积的砂、砂砾石层和亚粘土层呈不等层厚互层组成。这种含水层释水之后会产生固结、压密的塑性变形,从而产生地面沉降。

(3)深层承压水开采井(深 250～300 m)井管上升,而浅层(深度小于 80 m)则无此现象,说明埋深 100～300 m 的深层含水系统的固结、压密是引起西安地面沉降的主要原因。如地处小寨下沉中心附近的西安医学院内井管在 1983 年底上升了 15.7 cm,1982 年 12 月至 1983 年 11 月间上升了 3.5 cm,说明该处地面沉降限于含水层以上的部分。

(4)市区西北是地面沉降中稳定的地区,而南郊则是地面沉降剧烈地区。引起这种现象出现的原因有两种:① 水文地质条件的差异:南郊砂层细,厚度小,单层厚度也小,压粘土厚,固结程度差,压缩层厚度大,层数多。与此相反,西北郊含水砂层粒度大,单层厚度及总厚度都较大,粘性土总厚度较小,固结程度高,压缩层数少,厚度也小;② 据市自来水公司介绍,由于南郊地势高,市自来水难以保证供应,迫使当地机关、单位都打自备井,因此,此处地下水的开采量远远大于西北郊。

(5)西安地面沉降中的起伏与地貌明显相关。其形成的原因:① 人类活动多集中在平坦低洼的地方,特别是抽水井多选在地势较低的地方;② 西安市的梁洼地貌与构造关系密切,这些构造对地下水的运移、补给也会带来一定影响;③ 现今构造应力场对西安市的构造地貌也会起到一定作用,这种作用会通过构造形变显现出来,从而成为造成地面沉降与地貌相关的因素之一。

(6)西安市地面沉降的槽状结构主要与洼地地区的粘土层(淤泥层)结构有关,粘土层(淤泥层)和抽水量对地面沉降起着主要控制作用。

5 认识与讨论

(1)西安地面沉降和国内外绝大部分地面沉降区引起沉降的原因一样,其主要原因是过量抽取地下水。

(2)地面沉降在西安市南郊、东郊及西南郊显著,在市区及西北郊不甚明显,这与地下水的开采情况及地质结构状况有关。

(3)随着黑河引水工程的全面竣工,西安地区沉降中心的地面沉降将得到控制。

致谢 巩守文、赵振才、郭逢英、刘家惠等参加了该项目的前期研究工作,在此谨表衷心感谢。

参 考 文 献

高金川,刘娟. 1999. 西安地裂缝活动多因素影响的 GM(1,N)数学模型. 地壳形变与地震,19(1):56～64.

李永善,耿大玉,李金正等. 1992. 西安地裂及渭河盆地活断层研究. 北京:地震出版社.

吴嘉毅,廖燕鸿. 1990. 西安地裂缝的工程性质. 西安:陕西科学技术出版社.

张家明. 1990. 西安地裂缝研究. 西安:西北大学出版社.

张四新,张希. 1997. 关中地区近期地壳垂直形变特征. 地震,17(4):404～410.

赵振才,祝意青. 1989. 临潼-长安断裂构造形变. 内陆地震,(4):362～367.

References

Gao Jinchuan, Liu juan. 1999. GM(1,N) math model of ground fracturing activity. Crustal Deformation and Earthquake, 19(1):56～64 (in Chinese with English abstrat).

Li Yongshan, Geng Dayu, Li Jinzheng. 1992. Research on ground fissures in Xi'an region and active faults in Weihe basin. Beijing: Seismological Press (in Chinese).

Wu Jiayi, Liao Yanhong. 1990. Engineering feature of ground fracturing in the region of Xi'an. Xi'an: Science and Technology Press of Shannxi (in Chinese).

Zhang Jiaming. 1990. Research on ground fracturing in the region of Xi'an. Xi'an: Northwest University Press (in Chinese).

Zhang Sixin, Zhang Xi. 1997. Recent characteristics of crustal deformation in Xi'an region. Earthquake, 17(4):404～410 (in Chinese with English abstrat).

Zhao Zhencai, Zhu Yiqing. 1989. Tectonics deformation of Lintong-Chang'an fault. Inland Earthquake, (4):362～367 (in Chinese).

万方数据