

广饶县地面沉降成因及预测分析

张乐¹,赵景蒲¹,王浩²,康晓霞³

(1.东营市国土资源局,山东 东营 257091;2.山东省鲁北地质工程勘察院,山东 德州 253000;3.东营市国土资源局东营分局,山东 东营 257091)

摘要:地面沉降是指由于自然因素或人类工程活动引发的地下松散岩层固结压缩,并导致一定区域范围内地面高程降低的地质现象,是一种缓变性地质灾害。广饶县地处东营市南端,根据2004—2016年地面沉降监测资料,其沉降中心累计沉降量已超过了1500 mm,最大沉降速率超过70 mm/a,属地面沉降强发育。通过对地面沉降发生、发展规律和引发地面沉降的成因进行了分析,并在现状条件下对地面沉降趋势进行了预测分析。

关键词:地面沉降;沉降速率;地下水;广饶县

中图分类号:P618.31

文献标识码:B

引文格式:张乐,赵景蒲,王浩,等.广饶县地面沉降成因及预测分析[J].山东国土资源,2018,34(8):56-61.ZHANG Le,ZHAO Jingpu,WANG Hao,etc.Analysis on the Origin and Predication of Ground Subsidence in Guangrao County[J].Shandong Land and Resources,2018,34(8):56-61.

我国自20世纪20年代初在上海和天津市区发现地面沉降以来,短短几十年,长江三角洲主要城市及平原区、天津市平原区、华北平原东部地区相继产生地面沉降;20世纪80年代,中小城市和农村地区地下水开采利用量大幅度增加,地面沉降范围也由此从城市向农村扩展,在城市连片发展^[1]。东营市自2002年首次进行地面沉降水准测量,广饶县为沉降中心^[2]。目前已与滨州博兴县地面沉降中心连成一片,由于地面沉降具有持续时间长、影响范围广、成因机制复杂和防治难度大等特点,对城市规划建设、社会经济发展和人民生活构成极大的威胁^[3]。

1 地质背景条件

1.1 地层

广饶县地层发育较齐全。中生代以来受燕山运动和喜马拉雅运动的影响,该区一直缓慢下降,其上沉积了巨厚的新生代地层,对该区地面沉降可能存在影响的地层主要有古近纪孔店组、沙河街组、东营

组,新近纪馆陶组、明化镇组及第四系^[4]。

区内第四系根据地层结构、成因类型和沉积物来源分为山前平原区和三角洲平原区。山前平原区主要分布于中南部地区,层底埋深168.45~269.0 m。以冲积洪积相沉积为主,并有湖相沉积;地层岩性主要为粉土、粉质粘土及砂层的互层,局部以粉土为主,砂层颗粒南粗北细,多为中细砂,颜色以棕黄、褐黄为主,其次为棕红、灰绿,结构较密实,局部钙层胶结成岩。黄河三角洲平原区主要指广饶县北部地区,层底埋深252.0~320.0 m,主要为冲积、海积及湖积相沉积。岩性以粉质粘土为主,夹粉土及细砂或粉细砂,颜色多为棕黄、棕红、灰绿等^[5]。

1.2 水文地质条件

广饶县位于黄河下游黄河三角洲地区,中南部是泰沂山北麓山前冲洪积平原与黄河三角洲交接地带,深层沉积物主要来源于南部河流搬运来的冲洪积物^[6]。自古近纪以来,随着地壳的下降,泰沂山北麓山前冲洪积扇不断向南缩退,被黄河冲积和海相层覆盖,使含水层组的分布和富水性具有水平和

收稿日期:2017-12-21;修订日期:2018-01-08;编辑:陶卫卫

基金项目:东营市财政局、国土资源局《关于下达2014年省级矿产资源专项资金预算指标的通知》东财建指[2014]134号

作者简介:张乐(1986—),男,山东东营人,工程师,主要从事地质矿产勘查管理工作;E-mail:dydk05@126.com

①山东省鲁北地质工程勘察院,东营市地面沉降网络和数据库建设报告,2016年。

垂直分带规律:含水层自南向北,由下而上,层数由少到多,单层厚度由厚变薄;含水层颗粒由粗变细;南部含水层岩性主要为中粗砂夹砾石,向北逐渐变为中细砂和粉砂。区内的地下水系统由浅层潜水—微承压水系统(埋深0~60 m),中深层承压水系统(埋深60~200 m),深层承压水系统(埋深>200 m)构成。

1.2.1 浅层潜水—微承压水

浅层淡水主要分布于石村—颜徐—稻庄一线以南山前冲洪积平原。广饶县城北部附近为山前冲洪积扇(裙)的前缘地带,含水层岩性以细砂、粉细砂为主,累计厚度小于5 m,单井涌水量小于500 m³/d。广饶县南部主要有李鹊—石村、西营—稻庄、大王镇—南郭大致SN向3条淄河古河道展布,含水层岩性以细砂、中细砂为主,局部有中粗砂和含砾粗砂,砂层厚度10~20 m,单井涌水量500~1 000 m³/d。水化学类型为重碳酸盐型。

1.2.2 中深层承压水

广饶县陈官乡—丁庄乡一线以南,含水层岩性以粉细砂、细砂为主,含水层厚度20~40 m,单井出水量500~1 000 m³/d,为矿化度小于1 g/L的重碳酸硫酸盐型、重碳酸盐型及重碳酸氯化物型水。广饶县南部石村—西刘桥一线以南,含水层岩性以粉细砂、细砂为主,局部有中粗砂,含水层厚度40~50 m,单井出水量大于1 000 m³/d,主要为矿化度小于1 g/L的重碳酸盐型和重碳酸硫酸盐型水。

1.2.3 深层承压水

主要分布于广饶县城及其西南部,广饶县大码头乡以东及陈官乡西部,含水层岩性以细砂、粉细砂为主,累计厚度40~50 m,单层厚度一般2~5 m,含水层顶板埋深大于230 m,单井涌水量大于1 000 m³/d,矿化度一般小于1 g/L,水化学类型主要为重碳酸氯化物—钠型,其次为重碳酸硫酸氯化物—钠型。

1.3 工程地质条件

根据区内钻孔资料,广饶县主要沉降区域埋深700 m以内地层可划分为6个含水层及7个压缩层。各压缩层、含水层的划分宏观上以地层为界,原则上把砂层划为含水层,粘性土划为压缩层;砂性土视相邻地层岩性而定,以降低区内工程地质层的复杂程度为目的,相应地划入含水层及压缩层,各主要压缩层物理力学参数见表1。

表1 主要压缩层物理力学参数

计算层	孔隙比	压缩系数	固结系数	厚度 (m)
	e	a (MPa ⁻¹)	C_v (cm ² /s)	
第一压缩层	0.743	0.260	0.056	12
第二压缩层	0.725	0.128	0.042	20
第三压缩层	0.711	0.095	0.030	28
第四压缩层	0.633	0.056	0.019	25
第五压缩层	0.617	0.035	0.012	46
第六压缩层	0.591	0.030	0.008	80
第七压缩层	0.546	0.026	0.004	29

2 地面沉降现状

2.1 地面沉降现状

将2004年7月进行的水准测量数据与2016年2月测量数据进行对比,同时结合国土测绘院2008—2014年GPS地面沉降测量数据,广饶县沉降中心YD10号点处(山泰集团商务会馆附近),自2004年7月以来累计沉降量已超过1.5 m(2004年7月的地面标高为8.012 m,到2016年2月地面标高降低至6.577 m,标高损失1.535 m)(图1),且目前沉降速率仍大于70 mm/a^[7]。

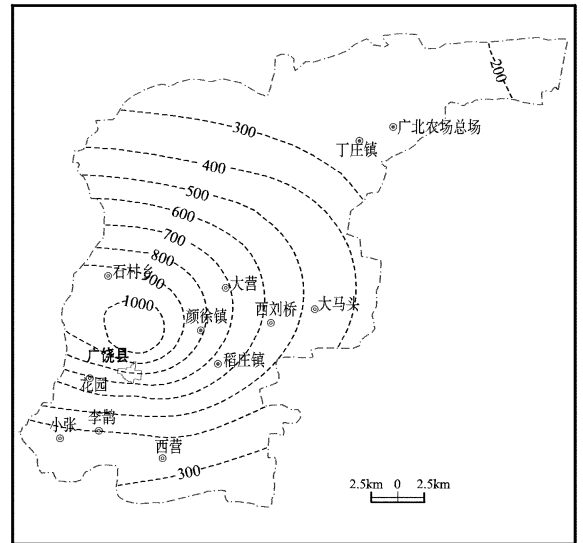


图1 2004—2016年地面沉降量等值线图(mm)
(据东营市地面沉降网络和数据库建设报告,2016年)

2.2 沉降发展规律

以2004年7月为起始点,分别与2008年6月、2012年8月、2016年2月测量数据进行了对比分析,从图2可以看出,原点组没有沉降,淄博市境内

各点沉降量很小,进入广饶后沉降点出现了明显的下沉,随着路线向北延伸,沉降量逐渐增大,在广饶县城北开发区沉降量达到最大为 1 535.0 mm;再向北延伸沉降量有所减少,在牛庄镇沉降量最小为 142.0 mm。

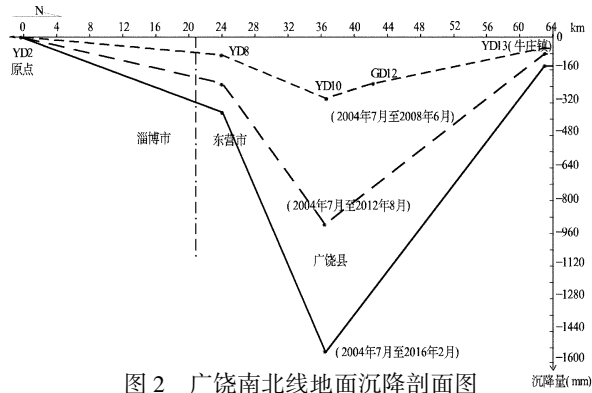


图 2 广饶南北线地面沉降剖面图

(据东营市地面沉降网络和数据库建设报告,2016 年)

广饶城区累计沉降量最大的 YD10 监测点,2002 年 12 月的地面标高为 8.182 m,到 2016 年 2 月地面标高降低至 6.577 m,标高损失 1.605 m,平均每月损失 10.15 mm。地面标高变化在曲线图上表现为线性持续下降(图 3),说明广饶县地面沉降中心沉降速率变化很小,近 15 年来一直以较稳定的沉降速率持续下沉。

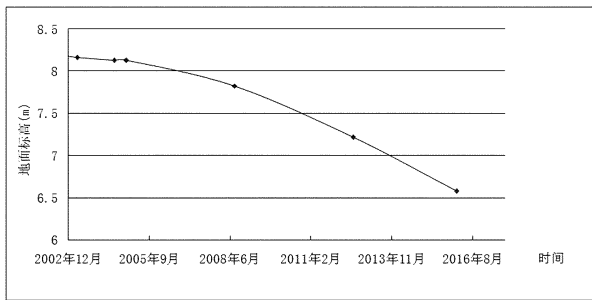


图 3 YD10 高程动态变化曲线

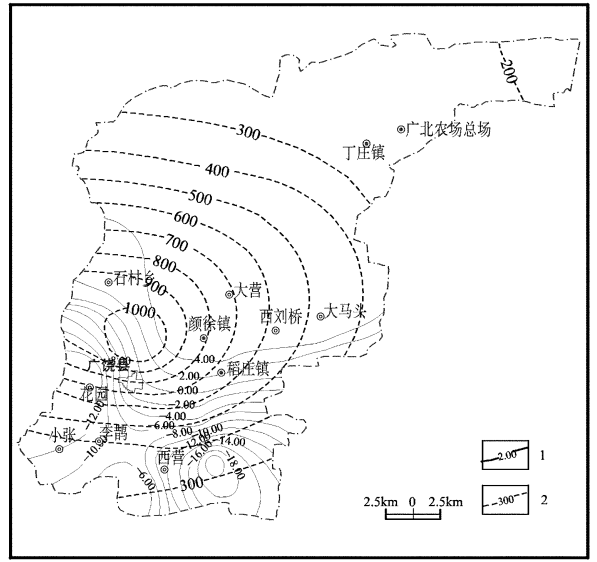
3 地面沉降影响因素分析

3.1 地下水开采

3.1.1 浅层地下水开采

广饶县小清河以南淡水资源丰富,多年来对地下水的开发利用一直处在一个较高的水平上(2010—2015 年均维持在 5 000 万 m³/a 左右)。水位埋深相差较大,总体特征是南深北浅,至李鹊—大王一线附近(即漏斗中心)达到最大,再向南又逐渐

减小。根据 2015 年水位监测数据,小清河附近地下水年平均水位埋深在 5.49 m 左右,而漏斗中心大王镇附近最深埋深已达 41.54 m。从浅层地下水等水位线与地面沉降量图(图 4)可以看出,浅层地下水水位线与地面沉降中心相距较远,并无明显相关性,由此分析,浅层地下水开采不是该地区地面沉降的主要因素^[8]。



1—浅层地下水水位等值线(m);2—2004—2016 年地面累积沉降量等值线(mm)

图 4 浅层地下水等水位线与地面沉降量图

3.1.2 中深层地下水开采

(1) 地下水开发利用现状与动态特征

中深层地下水开采:区内中深层淡水主要分布于广饶县陈官乡卧佛庄—丁庄乡丁屋—广北农场一线以南,集中开采区主要有广饶县经开区、大王镇和稻庄镇,全县近年来中深层地下水开采量在 2 000 万 m³/a 左右(2010—2015 年)。

水位动态:根据广饶县中深层地下水监测点监测数据,其水位在不同地段相差较大,各监测点年平均水位标高及埋深见表 2。

表 2 广饶县中深层、深层地下水年平均水位和埋深(2015 年度)

监测点位置	年平均水位(m)	年平均埋深(m)
自来水公司(深层)	-45.64	60.64
大码头东燕(深层)	-49.61	53.21
稻庄镇北店(深层)	-38.63	45.63
广饶水利局(中深层)	-23.68	38.51
丁庄郭王(中深层)	-21.4	23.82

中深层、深层地下水水位受大气影响极其微弱,而主要受人工开采的影响,大部分监测点年内水位主要呈现出下降趋势。如广饶县丁庄镇郭王监测井,年初月平均水位为 -21.00 m ,年末月平均水位为 -21.48 m ,下降了 0.48 m ;大码头东燕监测井部分时段上升,部分时段下降,可能是受周边其他开采井的影响,但总体上还是呈现出下降趋势,其年初和年末月平均水位分别为 -48.49 m 和 -49.86 m ,下降了 1.37 m 。

地下水降落漏斗:根据广饶县地下水多年监测资料,水位主要呈现出下降趋势。如广饶县丁庄镇郭王监测井(J1),建点初期水位标高为 -12.68 m (2012年1月),至2015年年底,下降了 8.80 m ,平均下降速率 2.20 m/a (图5)。

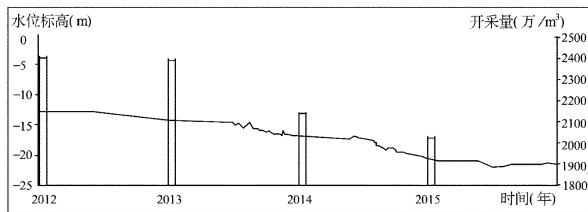


图5 郭王监测井J1地下水水位动态曲线图

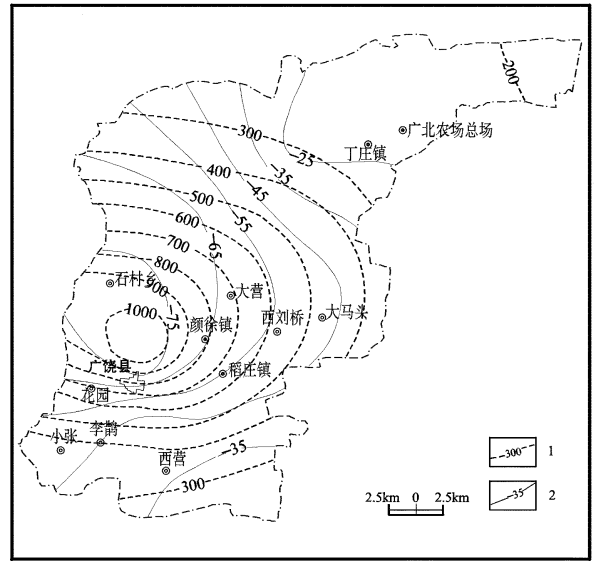
目前集中开采的广饶县城北部地区已形成了超采漏斗,其中心水位埋深已达 95 m 左右(图6)。根据水位监测资料,漏斗中心近10多年来水位平均下降速率在 2 m/a 以上,其他地区水位下降速率一般小于 1.5 m/a 。

(2) 地下水开采与地面沉降相关性

区内自20世纪60年代开采中深层地下水以来,地下水位埋深不断下降,水头不断降低,中深层及深层地下水一直处于超采状态^[9]。从图4可以看出,深层地下水降落漏斗中心与地面沉降中心位置一致,均处于广饶县城区北侧一带,且漏斗形状和扩展范围也基本相似。漏斗中心水位标高与地面标高随时间的变化曲线也基本相似,两者之间存在高度的相关性^[10]。结合工作区实际情况,可以看出中深层地下水的超量开采是该区域地面沉降产生的主要因素。

3.2 城市建设

主要包括地面建筑物、公路交通造成的地面沉降。随着区内经济和城市建设的快速发展,建筑物越来越密集,特别是高层建筑的兴建,对其下部地层



1—2004—2016年地面累积降水量等值线(mm);2—中深层地下水水位等值线(m)

图6 中深层地下水等水位线与地面降水量图

持续加载,造成上部松散地层固结压缩,引起较大范围的地面沉降^[11]。因此城市建设对地面沉降也有一定的影响。

3.3 构造运动

广饶县以及黄河三角洲位于自古近纪以来的地壳长期下沉地区。1955—1988年的地面垂直形变观测表明,在30多年内,黄河三角洲仍以下降为主,地面沉降速率达到 $3\sim 4\text{ mm/a}$ ^[12]。此影响因素在广饶县地面沉降发展中仅占较小的比重,不是其主要因素^[13]。

3.4 土的自然固结

广饶县全新世的地层沉积较晚,其沉积环境受黄河和海洋交互或共同影响,形成了以细颗粒为主的地层。所表现出的岩性以粉土最为广泛,其次为粉质粘土、粉砂、粘土,土的先期固结压力较低,在自重压力下,仍要固结压密,必然会自然沉降。这种自然沉降与开采地下流体导致的地面沉降无关,是常量,但在微量沉降条件下,自然沉降量也不可忽视。

3.5 其他影响因素

其他影响因素如人类工程活动中油气资源的开发、地热资源的开发利用等。在广饶县地面沉降中心区域,油气资源开发利用相较东营市其他区域要小得多,同时广饶县目前仅有4眼地热井,且因出水

量较小基本处于停采状态,因此也不是区内地面沉降的主要影响因素^[14]。

4 地面沉降预测

4.1 地面沉降模型

运用一维太沙基固结理论中的有效应力原理近似地解释开采地下水所引起的地面沉降演变过程,这是目前学术界普遍应用的一种理论^[15]。广饶县中深层地下水集中抽水面积较大,区内100~700 mm深度内地层结构以粘性土为主,砂性土仅占10%~15%左右,多年来由于大量开采深层地下水,使地层内产生负压而压缩,从而造成地面沉降。该次按照Terzaghi一维固结模型^[16]进行沉降量估算。

(1)按一维固结理论的总应力法计算土层最终变形量:

$$S_{\infty} = \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta p \cdot H \quad \Delta p = \Delta h \cdot r_w$$

式中: S_{∞} —土层最终变形量(mm); a_v —压缩系数(kPa^{-1}); e_0 —初始孔隙比; Δp —水位变化施加于土层的附加荷载(kPa); H —计算土层厚度(mm); Δh — t_1 — t_2 时刻含水层的水位变幅(m); r_w —水的重度(kN/m^3)。

(2)预测某时刻土层随时间变化的变形量:

$$S_t = S_{\infty} * U$$

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-N} + \frac{1}{9} e^{-9N} + \frac{1}{25} e^{-25N} + \dots \right] \approx 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-N}$$

$$N = n \cdot t = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{K(1+e)}{a_v \cdot r_w \cdot h^2} \cdot t = \frac{\pi^2 \cdot C_v}{4 \cdot h^2} \cdot t$$

式中: S_t —某时刻 t 土层的变形量(mm); U —固结度(%); N —时间因素,无量纲; t —时间(月); K —渗透系数(cm/s); h —最大排水距离(mm); C_v —固结系数(cm^2/s)。

4.2 预测结果

根据广饶县城区工程地质孔实测压缩层参数值,以2016年初为基准年,沉降中心地下水位下降速率按2.0 m/a计算,则10年后,沉降中心广饶县城区北YD10点处地面沉降新增总量为674 mm(表4)。

表4 地面沉降预测

计算层	第三 压缩层	第四 压缩层	第五 压缩层	第六 压缩层	第七 压缩层
厚度(m)	28	25	46	80	29
10年末固结度(%)	95.86	92.36	47.79	26.37	43.94
最终沉降量(mm)	310.93	171.46	199.13	301.70	97.54
预测沉降量(mm)	298.04	158.37	95.16	79.57	42.86

5 结论

自2004年广饶县开始地面沉降监测以来,中心沉降区(YD10)累积沉降量已超过1.5 m,且沉降速率没有减缓的趋势,根据综合分析认为,其主要原因是区内中深层地下水的超量开采。按照漏斗中心水位下降速率1.0 m/a预测,沉降中心10年后新增沉降量在674 mm。而目前沉降中心中深层地下水年降速达到了2.0 m/a,因此应严格管控区内地下水的开发利用,多渠道引进水源及研究切实可行的地下水回灌方案,以防止地面沉降进一步加剧。

参考文献:

- [1] 刘勇,李培英,丰爱平,等.黄河三角洲地下水动态变化及其与地面沉降的关系[J].地球科学,2014(11):1555-1556.
- [2] 宋波,王德生,王锦丽.东营地面沉降监测[J].地矿测绘,2004,20(1):34-36.
- [3] 徐丽雯,黄海军,刘艳霞,等.黄河三角洲地区人工建筑对地面沉降的影响研究[J].海岸工程,2015,34(3):33-43.
- [4] 毛继军,孟黎,苏艳红,等.基于GPS的东营市地面沉降监测研究[J].工程勘察,2014,42(10):56-59.
- [5] 姜媛,田芳,罗勇,等.北京典型地区分层地面沉降与地下水位变化关系[J].南水北调与水利科技,2015,13(1):95-99.
- [6] 刘咏明,崔圆圆,计孝飞,等.基于Modflow的地下水降落漏斗发展预测及防治对策——以东营市广饶地区为例[J].山东国土资源,2015,31(3):51-54.
- [7] 刘志涛,沙福建,蒋书杰.广饶县浅层地下水水化学演化分析研究[J].山东国土资源,2017,33(3):48-51.
- [8] 陈兴贤,骆祖江,金玮泽,等.高层建筑荷载、地下水开采与地面沉降耦合研究[J].应用基础与工程科学学报,2015(2):285-298.
- [9] 宋印胜.地面沉降影响因素定量分析法比较[J].山东国土资源,1999,15(1):46-51.
- [10] 孙斌,武显仓,林广奇,等.东营市地面沉降模型的构建与应用[J].山东国土资源,2017,33(4):63-67.
- [11] 刘咏明,崔圆圆,邵震.黄河三角洲南部冲洪积扇区浅层地下水漏斗研究[J].山东国土资源,2015,31(12):33-36.
- [12] 赵悦文,刘长礼.集群建筑荷载在地面沉降中的作用[J].水文地质工程地质,2016,43(6):162-170.

- [13] 马书涛,张文静,盖广民,等.基于防治德城区地面沉降控制深层地下水开采的模拟研究[J].地下水,2016,38(4):34-36.
- [14] 刘明坤,冠文杰,罗勇,等.北京市地面沉降与地下水开采关系分析[J].城市地质,2016,11(1):21-25.
- [15] 胡彩萍,张景燕,郝梦圆,等.黄河三角洲生态区孔隙热储地热开发对地面沉降的影响分析[J].山东国土资源,2017,33(2):39-42.
- [16] 张永伟,李红霞,商婷婷,等.基于层次分析法的德州地面沉降易发区的可拓学划分应用[J].山东国土资源,2016,32(7):59-65.

Analysis on the Origin and Predication of Ground Subsidence in Guangrao County

ZHANG Le¹, ZHAO Jingpu¹, WANG Hao², KANG Xiaoxia³

(1.Dongying Bureau of Land and Resources, Shandong Dongying 257091, China; 2.Lubei Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Dezhou 253000, China; 3.Dongying Branch Bureau of Dongying Bureau of Land and Resources, Shandong Dongying 257091, China)

Abstract: Ground subsidence refers to the the consolidation and compression of underground loose rock strata which is caused by natural factors or human engineering activities. It also causes the ground elevation to be reduced in a certain area. It is a kind of slow degeneration geological disaster. Guangrao county is located in the south of Dongying city. According to land subsidence monitoring data in 2004—2016, the settlement center has exceeded 1500mm, and the maximum settlement rate is more than 70mm/a, which is a strong land subsidence area. Through analysis on the law of occurrence and development of land subsidence, the causes of land subsidence have been analyzed, and the trend of land subsidence under the current conditions have been predicated.

Key words: Ground subsidence; settlement rate; groundwater; Guangrao county