

沧州市地面沉降及防治对策研究

邢忠信¹ 李和学¹ 张熟¹ 郜洪强²

(1. 河北地勘局第四水文工程地质大队, 沧州 061000; 2. 河北省地质调查院, 石家庄 050081)

摘要: 沧州是环渤海地区的沿海开放城市, 又是全国著名的化工城市。由于过量开采地下水, 诱发了严重的地面沉降, 至 2001 年中心沉降量已超过 2 米, 已成为我国地面沉降最严重城市之一, 造成的影响和破坏也愈演愈烈, 而且本地区地面沉降尚处在快速发展阶段, 沉降速率近十倍于天津, 几十倍于上海, 尤其在沧州沿海一带, 近几年沉降速率仍呈上升趋势。由于地面沉降的不可逆性, 一旦成灾则很难恢复, 其严重后果是不言而喻的, 控沉减灾已成当务之急。本文重点阐述了沧州地区地面沉降现状、灾情和隐患, 分析了地面沉降规律和机理, 进行了地面沉降发展趋势预测, 提出了防治对策, 以期对沧州市地面沉降防灾减灾工作有所促进和借鉴。

关键词: 沧州市; 地面沉降; 机理分析; 趋势预测; 防治对策

1. 前言

沧州市位于河北平原东部, 滨临渤海, 地理位置优越, 发展前景广阔, 是全国著名的化工城市。然而沧州市又是环渤海地区严重缺水城市之一, 随着地下水大量开采, 地面沉降不断加剧, 至 2001 年中心沉降量已达 2 米多, 已成为我国地面沉降最严重城市之一, 造成的影响和破坏也愈演愈烈。进行地面沉降规律和机理研究, 采取可行的防治措施, 有效控制地面沉降的继续发展, 对沧州市防灾减灾、社会经济可持续发展具有重大意义。笔者根据近几年地质调查成果和分析研究, 对沧州市地面沉降取得了一些新的认识, 以期对沧州市防灾减灾工作有所促进和借鉴。

2. 区域地质环境概况

2.1 地形地貌 沧州市位于河北平原东部, 渤海湾西岸。由冲积平原和冲海积、海积平原亚区组成。海拔一般 2~15m, 地势平坦。海兴县小山有火山熔岩及火山碎屑组成的火山口地貌。

2.2 地层 本地区分布有第四系、新第三系、老第三系及其以前基岩地层。地层厚度受构造影响较大, 分布极不均匀, 从上到下分别是: 第四系 (Q) 350~550m; 新第三系 (N) 底界埋深 1350~2080m; 老第三系 (E) 底界埋深 1480~3300m。(图 1)

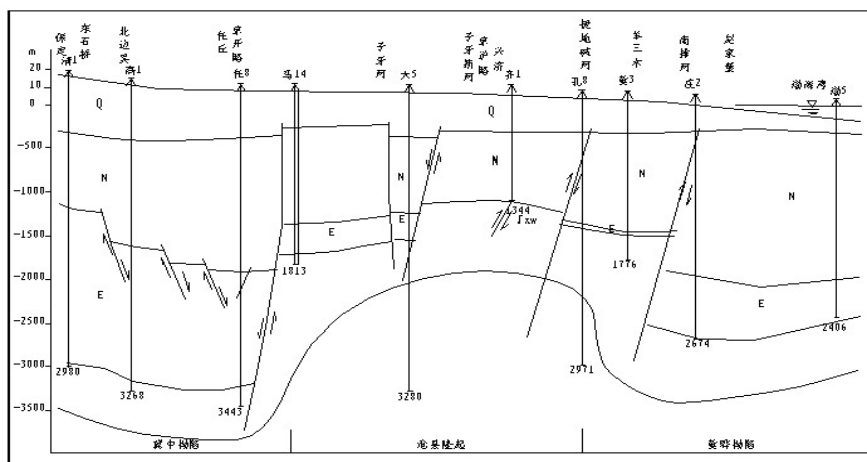


图 1 地层结构示意图

2.3 构造本地区位于二级构造单元华北断坳中北部。横跨 4 个三级构造单元，由西往东分别是：冀中拗陷、沧县隆起、黄骅拗陷、埕宁隆起（图 2）。冀中拗陷区总面积为 28350km²，基岩埋深 624—10300m。沧县隆起区总面积为 11000km²，基岩埋深 1200—1700m。黄骅拗陷区总面积 1000km²，基岩埋深 1250—8000m。埕宁隆起主体在山东境内，基岩埋深 <1000m。

沧东深断裂：为平原区的一条重要的隐伏断裂，区内长约 500km。累积垂直断距近 6000m，目前差异升降值为 1~1.5mm/a。

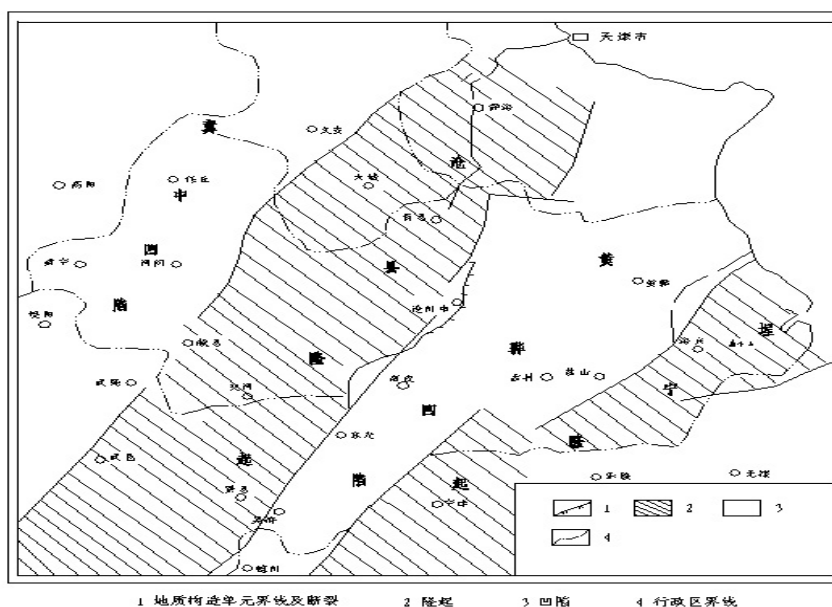


图 2 地质构造示意图

2.4 第四系含水层组本区的第四系含水岩系，自上而下划分为四个含水层组：第一含水层组底界面埋深 40~60m；第二含水层组底界面埋

深 120~170m；第三含水层组底界面埋深 250~350m；第四含水层组底界面埋深 350~550m。

2.5 第三系含水层组 第三系含水层组主要分为：上新统明化镇组，底界面埋深 800~1100m，是本区矿泉水的主要产出层；中新统馆陶组含水组，底界面埋深 1500~2300m，是本区地热水的主要产出层；下第三系含水层组，底界面埋深 3000~6000m，最大可达 8000m，是生油~含油地层。

2.6 地下水降落漏斗 沧州市地下水开采始于 20 世纪 60 年代中期，开采井多集中在城镇，主要是生活用水。进入 70 年代以后，农业开采占主导地位，由于过量开采地下水，地下水位急剧下降，到上世纪末，以沧州为中心形成了华北地区最大的水位降落漏斗（图 3）。

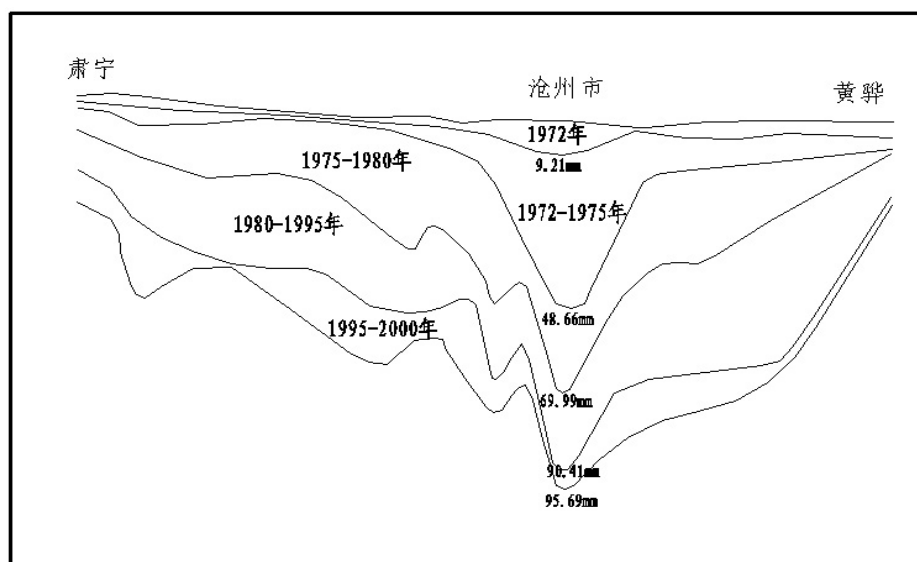


图 3 沧州市深层降落漏斗发展示意图

3. 地面沉降现状

沧州市地面沉降始于 70 年，当时沉降量只有 9mm；随着社会经济的不断发展，开采量不断增加，地面沉降量也随之不断增加，80 年中心累计沉降量 272mm，此阶段沉降速率 27.2mm/a；至 90 年中心累计沉降量 1131mm，该时段沉降速率 85.9mm/a，比上一时段增加了 58.6mm/a；至 2001 年沉降中心累计沉降量已达 2236mm，从 1990 年到 2001 年其沉降速率达 100.45mm/a（图 4）。另外，沉降范围随着各市抽取地下水、石油、地下热水的不断增加，相继出现任丘、河间、黄骅等沉降区。至 2001 年，累计沉降量 >500mm 的面积为 9716.85km²，

> 800mm的面积 3041.65km²。见图 5、表 1。

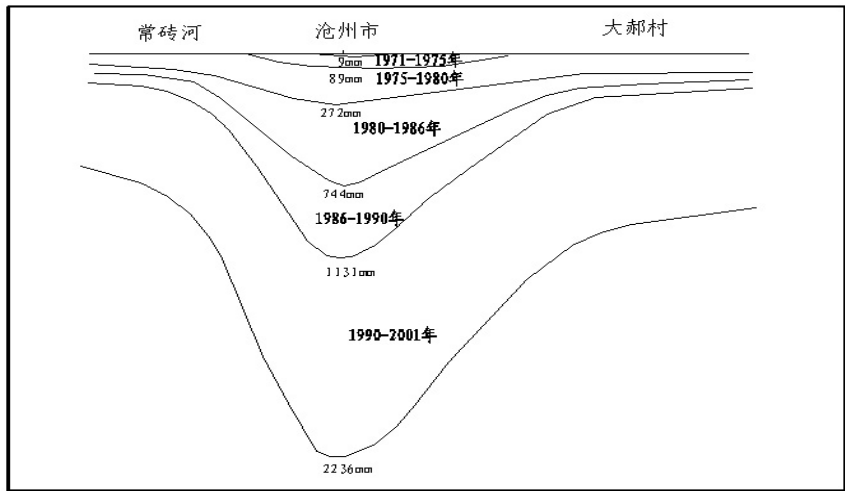


图 4 沧州市地面沉降历年变化示意图

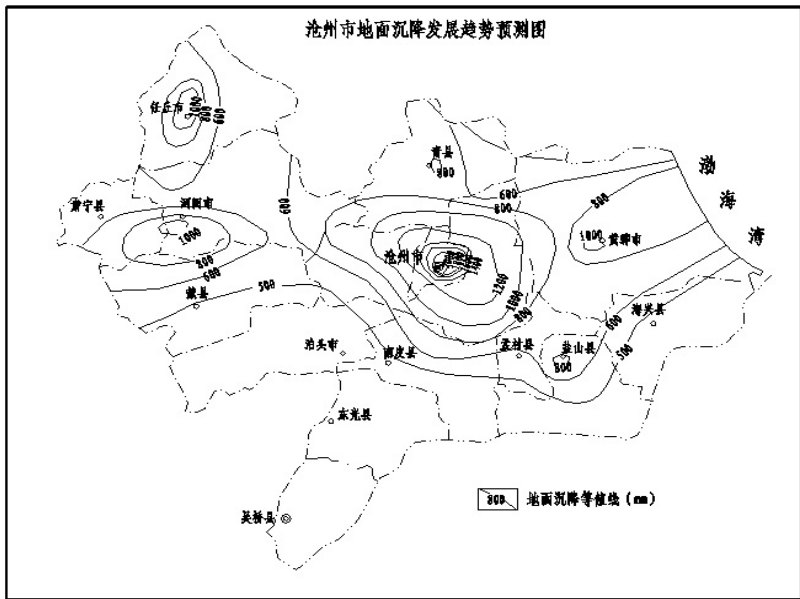


图 5 沧州市地面沉降等值线图

表 1 沧州市各沉降区面积统计表

沉降区	>2000mm 面积 (km ²)	>1500mm 面积 (km ²)	>1000mm 面积 (km ²)	>800mm 面积 (km ²)	>500mm面积 (km ²)
沧州市区	11.51	88.49	994.07	1748.45	9716.85
黄骅区	0	0	15.07	756.47	
河间区	0	0	26.45	328.81	
任丘区	0	0	66.89	207.92	

4. 地面沉降造成的灾害

地面沉降已成为沧州市的主要地质灾害之一，已造成了一系列的社会环境问题和灾害事件，对当地社会经济发展和人民生命财产安全已造成严重的影响主要有以下几个方面：

4.1 城市内涝积水

地面沉降城市普遍存在比较严重的滞汛积水问题，不仅影响城市交通和环境，而且常使地下室和低层建筑物在汛期被水侵没，造成比较严重的经济损失。例如：二十世纪六七十年代以前，沧州市除部分地带较低洼而积水外，大部分降水产生地面径流，自然排出市外，八十年代至九十年代，由于地面沉降，如遇到同样的降水量，区内已大部分积水，必须用人工扬水排出区外。九十年代至今，地面沉降加重，城市内涝积水也更加严重，市民的生产生活受到很大的威胁。2002年7月5日，沧州市降水量97 mm，整个沧州市区汪洋一片，市政设施管理处11个排水泵站33台水泵全部启动，连续48小时才将积水排完。见照片1。



照片1 沧州市区雨后积水

4.2 河床下沉，影响南水北调等引水工程安全

地面沉降造成河床下沉，影响引水工程的正常运行，特别是南水北调工程的安全。南运河从沧州市横穿而过，是引黄入津的通道，也是南水北调东线的经由之路，由于地面沉降，造成河床下沉，其过水能力锐减，已不及原设计能力的一半。2001年11月由于天津市用水告急，国家有关部门急调黄河水经南运河输往天津市。输水过程中沧

州市区段（全长 11.8km）的部分河段水位已接近漫堤（见照片 2），而在市区以外，河床只有半槽水（见照片 3），其运行水位比原设计降低 1.8m。这给引黄入津和未来的南水北调东线工程带来不利影响。



南运河市郊段

照片 2



曾官屯桥

照片 3

4.3 给水供气管道安全受到威胁

地面沉降相对而言是一个渐变的过程，到了一定程度，给水供气的管道将会随地面不均匀沉降而弯曲变形，导致管道漏水漏气，进而折断，直接影响市民生活以及工业生产，给当地人民的生命财产安全造成巨大威胁。沧州市给水管网 26km，仅 2002 年就破裂 776 次。

4.4 铁路安全受到威胁

由于地面沉降造成铁路路基下沉，铁路安全受到威胁。据调查，京沪铁路从沧州地面沉降中心穿过，由于地面沉降路基下沉，只好年年垫碎石加高，在沧州市地面沉降中心附近（见照片 4）铁轨下的垫



照片 4

石比原来加厚了 500mm 以上，如果地面继续沉降，垫石逐渐加厚，到一定的程度将失去稳定，不仅造成经济损失而且影响铁路安全运行。地面沉降的发展也给未来的高速铁路的建设和运营带来不利影响。

4.5 浅层地下水水位相对变浅引起一系列城市环境问题

地面沉降会造成浅层地下水水位相对变浅，从而引发一系列城市环境问题。水位变浅会加快混凝土及金属管线的腐蚀；造成建筑物地基承载力下降，基础侵蚀增强；对建筑基坑降水产生不利影响；对柏油路面也产生危害，大大减少使用寿命；对市区的绿化不利，树木成活低，直接影响市容市貌，加大城市建设成本。

4.6 河道防洪排沥能力降低

城市大多沿河发展，地面沉降不仅使城市高程进一步降低，而且拦河堤坝等防洪设施因沉降而发生破坏，导致一些城市御洪能力不断下降，出现严重的水患威胁。另外，沉降区内有子牙新河、捷地减河、南排河、漳卫新河、宣惠河、大浪淀排水渠、廖家洼排干、沧浪渠等行洪排沥河道，地面沉降将大大降低河道堤防的防洪标准，其危害将是巨大的。

4.7 地裂缝频发危及城乡建筑安全

最近 5 年沧州地区发现地裂缝三十多条，造成河堤、道路、建筑物等破坏，引发当地社会恐慌。究其原因大都与地面不均匀沉降有关。

4.8 加大风暴潮灾害危害程度 沧州沿海是风暴潮灾害的多发区，近 50 年来造成大灾的风暴潮有 5 次，给沿海人民的生命财产和经济建设造成重大损失。在滨海地区，地面沉降活动使陆地地面高程下降，海平面相对上升，导致海水侵袭和风暴潮灾害加剧。同时，滨岸防潮堤下沉，发生局部开裂，造成抗风暴潮能力的降低，加大风暴潮灾害危害程度。

4.9 油田油水井管上窜影响油田的正常开发

由于地面沉降，造成大港、华北油田油、水井发生了套管上窜现象，其中任丘任 7 断块属古潜山碳酸岩地层，共有油、水井 106 口，上窜井 71 口，套管上窜率高达 67%，上窜最高达到 1.20m，占套管上窜总井数的 40.3%。油水井套管上窜严重影响了油水井的寿命和油田

的正常开发。

4.10 地面高程资料大范围失效

地面沉降还导致观测和测量标志失效，地面高程资料是国民经济建设和发展的重要基础资料，大范围的高程损失及其不均衡动态变化，给相关工作带来严重的影响和干扰，同时也加大了相关工作的经费投入。

5. 地面沉降产生的原因与机理分析

引起地面沉降的原因可分为自然因素及人为因素。自然因素中，包括构造活动、软弱土层的自重压密固结、海平面上升等；人为因素中，包括过量开采地下水、地下热水及油气资源、大规模工程建设等。本区由于构造活动引起的地面沉降，速率仅 $1 \sim 2\text{mm/a}$ ，软弱土层的自重压密固结、海平面上升等引起的地面沉降和本区总沉降相比也是微不足道的。因此，就本区而言人为因素是导致地面沉降的主要原因。

5.1 地下水开采引起地面沉降

沧州地区水资源人均、亩均占有量都低于全国平均水平，是水资源量最为紧缺的地区之一，地下水是本区主要供水水源。深层地下水的开采程度达到 $180\% - 190\%$ 。地下水的长期超量开采导致大面积的地下水水位降落漏斗的形成并逐年扩展。

开采地下水会引起松散地层大量释水，使地层压缩、固结而产生沉降。沧州地区沉积有巨厚的松散层，其颗粒较细，结构复杂。主要开采层为第二、第三含水层组承压水，由于大量开采深层地下水，引起孔隙水压力降低和有效应力增大，致使含水层被压缩，颗粒接触面积增大，孔隙度减小并释水，产生弹性变形，其沉降量一般相当粘性土压缩率的 15% ，当含水层中的水压恢复后，骨架则复原，只形成暂时性地面沉降。粘性土层孔隙度大，孔隙微小，主要含结合水，当含水层与粘性土层之间的水头差足以克服水与颗粒之间的结合力时，水便从粘性土层中排出。释水时孔隙压缩，使粘土矿物颗粒接触面积增大，颗粒间发生相对位移，孔隙结构被破坏而发生塑性形变。当含水层中水压恢复后，只能使粘性土层被压缩的孔隙中水压升高，而不能使孔隙度和储容水量恢复到初始状态，形成永久性地面沉降。地面

沉降最大的沧州市沉降中心，其粘土累计厚度达 214.42m，亚粘土累计厚度 131.41m，主要开采段 200-400m 的粘性土累计厚度达 179.01m，为地面沉降的产生创造了物质基础，粘性土在深层地下水开发中的释水压缩是永久性的，它决定了地面沉降的不可逆性。

地面沉降的产生和发展过程与地下水的开采过程基本保持一致或滞后一个时段，地面沉降量与地下水水位下降幅度呈高度正相关，其分布范围与地下水水位下降漏斗基本一致(图 6、表 2)。地面沉降的产生和发展过程是含水层排水后孔隙水压力发生变化，相邻粘性土层排水固结变形的过程。由于含水层是以砂类土为主，排水固结在短时间内完成，而相邻粘性土层多为欠固结岩层，由于水的顶托压力下降，(孔隙水压力减小)，在上覆土层的自重压力下，排水固结是一个相对缓慢的过程，所以地面沉降滞后水位下降一个时段。当开采和补给能够趋向平衡时，开采层和弱透水层水位将先后趋于稳定，粘性土压密释水趋向缓和。在开采层水位先期稳定时，地面沉降仍在继续，但随着时间的推移地面沉降也将趋缓。

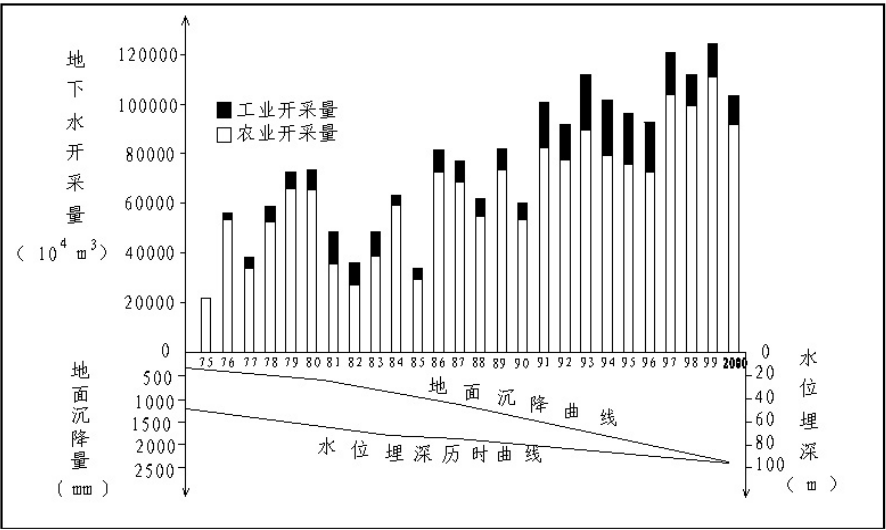


图 6 地面沉降与地下水开采过程关系示意图

表 2 沧州市沉降中心沉降量与水位埋深的关系

年 份	1971	1975	1980	1986	1990	1997	2001
开 采 量 ($10^4 \times \text{m}^3$)	451.0	1125.0	1597.8	1162.62	977.74	4182.0	3690.0
中心水位 埋 深	22.47	50.28	69.99	75.05	82.08	92.42	95.9
沉降速率 (mm/a)		20	36.6	78.7	96.75	118.6	68.75
沉 降 量 (mm)	25	89	272	744	1131	1961	2236

5.2 开采地热引起地面沉降

沧州地区蕴藏有地下热水资源，地下热水开采量逐年增加，抽取地下热水引起水位下降，地层内孔隙水压力减少有效应力增加，必然引起地层进一步压实而导致地面沉降。

5.3 开采油气资源引起地面沉降

在油气田区，开采油气资源也会引起地面沉降。根据大港油田的有关资料，2500m 以下普遍出现了欠压密地层，黄骅凹陷中最大异常地层压力系数为 1.552，发现于 3702.7m 处沙河街组地层中，当油气开发后，必将使流体压力降低，固体颗粒有效应力增加，使泥岩进一步固结压密，从而引起地面沉降。因此，石油天然气的开采也是引起油气田区地面沉降的因素之一。

5.4 地表荷载引起地面沉降

由于城市规模扩大，高大建筑物不断增加，铁路、桥梁等交通设施及运输荷载的影响，地表荷载加重，也加速了地面的沉降。

6. 地面沉降发展趋势预测

以沧州沉降中心为例，依据累计沉降量与地下水位降深的关系初步分析预测。累计沉降量与地下水位降深的关系曲线如图 7。

曲线方程为

$$S=2.9908e^{0.0695x}$$

式中：S—为某年累计沉降量

e—土层孔隙比

x—为该年水位降深值

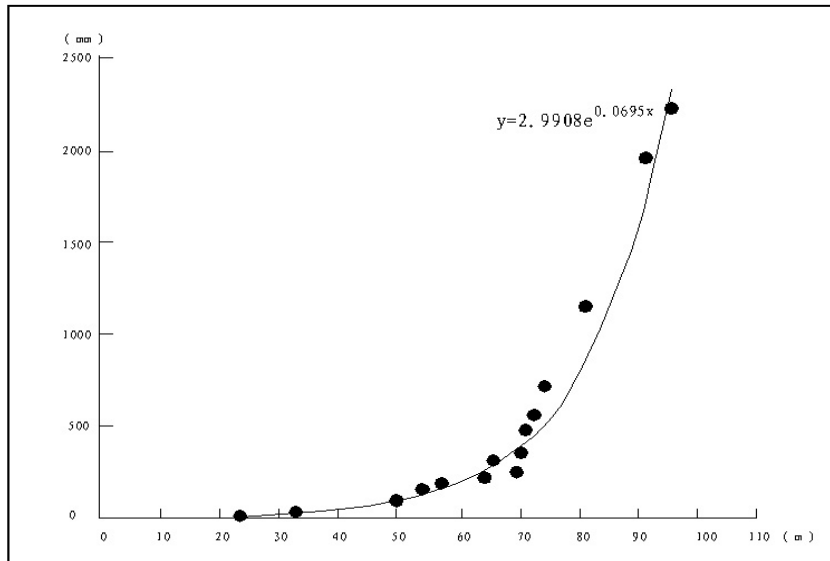


图 7 地面沉降量与地下水位降深的关系曲线

从曲线上各点及曲线的变化态势分析曲线可分为三个变化时段。

(1) 当水位降深 $< 40\text{m}$ 时, 曲线处于缓慢上升阶段, 也就是说随着降深的增加, 累计沉降量缓慢增加。说明水位降深 < 40 米时, 超静孔隙水压力增加量、土层厚度及上覆压力变化均较小, 土层应力变化后的压缩量较小。

(2) 当 $70 > x > 40\text{m}$ 时呈现明显上升趋势, 有明确的拐点, 说明 40m 水位降深应是一个警戒水位降深值, 超过这一值, 随降深的不断增加累计沉降量将加速度上升。

(3) 当 $x > 70\text{m}$ 时, 曲线是近乎直立上升趋势, $x=95\text{m}$ 时曲线与实测点吻合最好。通过曲线分析, 70 米降深应该是一个限制降深(止采)值, 超过它将产生严重的沉降后果。

理论上由于土层的受力压缩过程应是由缓变(上覆压力小于前期固结压力)到快速变化(超过前期固结压力结构开始变、破坏), 到急变(结构破坏)的过程, 但最终 $e_0 > e_1 > e_2 \dots\dots$ 当 e 越来越小, 压密程度越来越高时, 其压缩速率也将减小, 因本区资料所限, 曲线符合的方程式, 未作进一步推导, 尚有待进一步研究。

由于沧州市区内部分机井封井限采, 地下水位下降速率有所减缓, $2000-2002$ 年水位下降速率为 0.54mm/a , 依此预测 2010 年水位降深为 101.1m , 累计沉降量 3367.7mm 。

7. 地面沉降灾害防治对策

沧州地区地面沉降已到了非治不可的地步。防治措施可分为：监测预报措施；削弱灾害活动强度措施；受灾体防护措施；避灾措施。

7.1 监测预测

本地区地面沉降研究起步较晚、程度较低，严重滞后于控沉减灾需要。因此，首先要加强地面沉降调查与监测工作，基本方法是设置分层标、基岩标、孔隙水压力标、水准点、水动态监测点、海平面观测点等。定期进行水准测量；进行地下水开采量、地下水位、地下水压力、地下水水质监测及回灌监测等。区域控制不同水文地质单元，重点监测地面沉降中心、重点城市及海岸带。查明地面沉降及致灾现状，研究沉降机理，找出沉降规律，预测地面沉降速度、幅度、范围及可能危害，为控沉减灾提供科学依据。

7.2 控沉措施

(1) 根据水资源条件，限制地下水开采量，防止地下水水位大幅度持续下降，控制地下水降落漏斗规模。

(2) 根据地下水资源的分布情况，合理选择开采区，调整开采层和开采时间，避免开采地区、层位、时间过分集中。

(3) 人工回灌地下水，补充地下水水量，提高地下水水位。

7.3 防护措施

地面沉降除有时会引起工程建筑不均匀沉降外，主要是因沉降区地面标高降低，导致积洪滞涝，海水入侵等次生灾害。针对这些次生灾害，采取的主要防护措施是修建或加高加固防洪堤、防潮堤、防洪闸、防潮闸以及疏导河道，兴建排洪排涝工程，垫高建设场地，适当增加地下管网强度等。

7.4 避灾措施

搞好规划，一些对沉降比较敏感的新扩建工程项目，要尽量避开地面沉降严重和潜在的沉降隐患地带，以免造成不必要的损失。

8. 结语

河北平原地面沉降是我国沉降面积、沉降量和速率最大，类型最复杂的地区之一，而沧州市地面沉降最为典型，最为严重，已成为本区首

要地质灾害。其中心累计沉降量目前虽不及上海、天津，但本地区地面沉降尚在快速发展阶段，沉降速率近十倍于天津，几十倍于上海，尤其在沧州沿海一带，近几年沉降速率仍呈上升趋势。由于地面沉降的不可逆性，一旦成灾则很难恢复，其严重后果是不言而喻的，它危及到可持续发展和社会经济安全，所以控制其发展是当务之急。然而，本地区地面沉降研究程度相对较低，严重滞后于控沉减灾的需要，应尽快地开展本地区地面沉降调查、监测与研究，为控沉减灾提供依据，为社会经济可持续发展服务。

参考文献：

- [1] 陈望和，倪明云，等. 河北第四纪地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [2] 陈望和，等. 河北地下水 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.

Land Surface Subsidence in Cangzhou City and the Research on Countermeasure

XING Zhong-xin¹, LI He-xue¹, ZHANG Shu¹, GAO Hong-qiang²

(1. The Fourth Hydrogeological and Engineering Geological Party, Hebei Bureau of Geo-exploration, Cangzhou 061000; 2. Hebei Institute of Geological Survey, Shijiazhuang 050081)

Abstract: A serious land surface subsidence occurred in Cangzhou City, Hebei Province. In the subsidence center of Cangzhou City, the land surface has sunk for 30 years till to 2001 and for more than 2 m of subsidence amount, which caused waterlogging of some segments in the city and even subsidence of some riverbeds, that could seriously influence the security of the transfer water project from south to north. As result of investigation, it is proposed that the overpumping water and other solution caused subsidence of the land (the main cause). The very thick clay layer provides with the material basement for the land subsidence. Under pressure the clay will give out the water, so that it decided the land surface subsidence cannot be rebound. Through analysis between cumulative subsidence volume in different stages in Cangzhou region with ground water table depth, the relative volume between the two factors, the warning water table depth (critical volume is 40 m depth) and limited depth is 70 m (stop to pump) and land surface subsidence development tend is forecasted. The count measure for land subsidence by controlling ground water table avoid, and connecting with engineering measurement is proposed.

Keywords: Cangzhou City; land surface subsidence; mechanic analysis; trend forecast; prevention countermeasurement

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（200112400004）

作者简介：邢忠信（1958），男，教授级高工，河北省有突出贡献中青年专家，主要从事水文地质、工程地质、环境地质及地质灾害研究工作。