



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2017.02.025

田芳, 罗勇, 周毅, 等. 北京地面沉降与地下水开采时空演变对比[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 163-169. TIAN Fang, LUO Yong, ZHOU Yi, et al. Contrastive analysis of spatial temporal evolution between land subsidence and groundwater exploitation in Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 163-169. (in Chinese)

北京地面沉降与地下水开采时空演变对比

田芳¹, 罗勇^{1,2}, 周毅¹, 李宇³, 寇文杰¹, 姜媛³, 王荣¹

(1. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 2. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049;
3. 北京市地质矿产勘查开发局, 北京 100195)

摘要: 区域地面沉降是世界上很多城市都要面对的一种“城市病”。地下水过量开采是这一问题最普遍的原因, 北京也因此出现了严重的地面沉降问题。为了全面认识地下水开采格局变化下的地面沉降发育分布的新特点, 推动实现《北京地面沉降防治规划(2013-2020年)》中的“控沉目标”, 对北京市从解放初期至今60多年间的地下水开采和地面沉降演变进行了时间和空间上的定性定量对比分析。结果表明: 地面沉降的形成发展阶段与地下水开发利用阶段高度吻合; 地面沉降中心区与地下水位降落漏斗区的时空变化高度相关, 随着地下水开采深度整体上向地表以下更深层发展, 主沉降层逐渐向深部(100 m以下)地层转移, 为地面沉降防控决策制定提供了依据。

关键词: 地面沉降; 地下水; 时空演变; 北京平原区

中图分类号: P642.26 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)02-0163-07

Contrastive analysis of spatial temporal evolution between land subsidence and groundwater exploitation in Beijing

TIAN Fang¹, LUO Yong^{1,2}, ZHOU Yi^{1,2}, LI Yu⁴, KOU Wenjie¹, JIANG Yuan⁴, WANG Rong¹

(1. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China;

2. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China;

3. Beijing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Beijing 100195, China)

Abstract: Regional land subsidence is one of the city diseases which many cities in the world must be facing. Excessive exploitation of groundwater is the most common reason for urban land subsidence. Land subsidence is particularly significant due to groundwater exploitation in Beijing. Based on a method combining qualitative and quantitative analysis, a contrastive analysis of spatial temporal evolution between land subsidence and groundwater exploitation during 60 years was carried out in the paper in order to understand the new characteristics of land subsidence distribution with new conditions of groundwater exploitation and promote implementation of Beijing Land Subsidence Control Program (2013-2020). The results showed that it was quite consistent in the temporal patterns of formation and development between land subsidence and groundwater exploitation; the spatial temporal distribution of land subsidence center area was highly correlated with the changes of groundwater depression cone; the primary subsidence layers gradually shifted to deeper formation (with depth more than 100 m) along with the increase of the mining depth of groundwater. These findings will provide the basis for decision making of land subsidence control.

Key words: land subsidence; groundwater; spatial temporal evolution; Beijing plain area

收稿日期: 2016-11-14 修回日期: 2017-02-15 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 北京市科技计划课题(Z131100005613022); 北京市自然科学基金(8162043); 北京市地质矿产勘查开发局地质科研项目(dkjdzky2013005); 北京市政府财政项目(国土京环[2004]75号)

Funds: Beijing Municipality for Science and Technology Planning Programs/Projects(Z131100005613022); Beijing Municipal Natural Science Foundation(8162043); Geological scientific research project of Beijing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development (dkjdzky2013005); Beijing Municipal financial project([2004]75)

作者简介: 田芳(1981-), 女, 山东威海人, 高级工程师, 主要从事地面沉降监测与研究。E-mail: TTFr-001@163.com

地面沉降现象在世界范围内普遍存在,作为一种“缓变地质灾害”,具有成灾慢、持续时间长,影响范围广等特点,可导致建筑物开裂破坏、城市内涝、降低防潮抗洪能力等各种灾害。目前我国遭受地面沉降灾害的城市超过50个,据粗略统计,从1949年以来由其造成的经济损失累计高达4 500~5 000亿元^[1]。其中最严重的长江三角洲(上海、苏锡常、杭嘉湖等)、华北平原(北京、天津、河北沧州、山东德州等)和汾渭盆地(西安、太原),这三个区域性的地面沉降区,过量抽取地下水是最主要的原因^[2,9]。

在国内外主要因地下水开采而发生地面沉降的地区,尽管发生地面沉降的地质环境模式不同,如美国得克萨斯州休斯顿、意大利艾米利亚-罗马涅区、上海、苏锡常和天津属同属于沿海三角洲地区,西安和太原属于内陆断陷盆地,但是地面沉降演化对地下水超采的响应具有普遍性^[10,11]:(1)在采取地下水限采措施之前,地面沉降的发展一般会经历缓慢、显著、急剧沉降等几个阶段,与同期地下水的少量、大量、超量开采等几个阶段相对应;(2)地面沉降与地下水降落漏斗在时间上和空间上的演化具有良好的一致性;(3)地面沉降主要压缩层位随着地下水主要开采层的变化而变化。关于北京地区地面沉降对地下水开采的响应,前人也有过研究,如基于InSAR监测和地下水动态监测从平面上系统分析北京地区地下水降落漏斗区和地面沉降的形成演化^[14],分层压缩变形量与地下水位变化的定性定量关系^[15]等。

国土资源部和水利部于2012年3月2日印发了《全国地面沉降防治规划(2011-2020年)》,全面部署和推进地面沉降防治工作。北京市也制定了《北京市地面沉降防治规划(2013-2020年)》,提出控沉指标“区域地面沉降速率”和“沉降中心沉降速率”到2020年分别控制在15 mm/a和30 mm/a以内。北京市地面沉降当前仍处于快速发展阶段,沉降中心最大年沉降速率从2007年-2010年连续超过100 mm/a^[16],实现控沉目标任务艰巨。鉴于此,本文将从时间空间维度上对比建国至今60多年来北京平原区地面沉降形成发展和地下水开发利用,基于地下水动态监测、地面沉降高精度水准测量和分层标数据,揭示地面沉降随地下水开采布局 and 开采层次变化而出现的新特点,最后探讨了北京冲洪积平原地质环境模式下的地下水开采引发地面沉降的共性和特性,以为有效控沉提供依据。

1 地面沉降形成发展与地下水开采的时间演变

北京市的地下水开发利用从解放后到现在可分

为初步开发、开采增加、开采控制和严重超采四个阶段。依据地面沉降区的变化范围、面积、沉降量和沉降速率等特征,北京市地面沉降的形成发展过程也可划分为形成、发展、扩展及快速发展四个阶段^[17]。两者各个阶段的主要特征对比如下。

1.1 地下水初步开发阶段与地面沉降的形成阶段

从20世纪50年代到20世纪70年代初,北京市地下水处于初步开发阶段,采补整体基本平衡,只在城近郊局部地区出现超采。地面沉降也只出现在超采区。

1949年北京市解放时地下水开采量为803万m³^[17]。解放后,随着人口和工农业发展,地下水资源开始大规模开发。1961年全市平原区地下水开采量为5.2亿m³,1965年则大幅增加到12.11亿m³,从1961年到1970年,平均每年的地下水开采量为10.79亿m³。这一时期,城近郊区地下水开采量增加最为明显,1965年的地下水开采量为4.8亿m³,占当年全市地下水开采总量的40%左右。据1955年-1966年水准测量数据,东郊纺织工业区和东北郊酒仙桥电子工业区的累计沉降量分别达到58 mm和30 mm。1971年平原区地下水开采总量为13.8亿m³,在地下水开采量大幅增加的城近郊区(东部的八里庄-大郊亭、东北部的来广营-酒仙桥一带)形成区域性地下水降落漏斗。东八里庄-大郊亭沉降区和来广营沉降区逐渐形成,面积不断扩大,沉降速率每年几毫米到二十几毫米,最大累计沉降量到1973年分别达到230 mm和126 mm,大于50 mm的沉降区面积扩大至400 km²。

1.2 地下水开采增加阶段和地面沉降的发展阶段

从20世纪70年代中期到80年代初,地下水开采量显著增加,地下水年亏损量也逐年增大,城近郊区超采现象严重,地面沉降区相对集中,沉降速度快,累计沉降量大。

这一时期的地下水开采程度显著提高,开采量是20世纪60年代初的两倍多。到1978年,地下水年开采量突破25亿m³。城近郊区地下水出现严重超采,十年间的地下水储存量减少了12.42亿m³。远郊区县地下水开采量也有较大增长,但未达到严重超采程度。从这时起,北京市地下水资源逐年累积超采。20世纪80年代初期降水连年偏少,每年的地下水开采量在26~28亿m³,城近郊区年开采量最高时可达9.52亿m³。据1983年5月水准测量数据,东郊地面沉降区累计沉降量大于50 mm

的区域面积达到 600 km², 呈快速扩展趋势, 形成东部大郊亭和东北部来广营两个沉降中心, 1955 年—1983 年的累计地面沉降量分别达到 590 mm 和 307 mm。其它各区地面沉降不明显。

1.3 地下水开采控制阶段和地面沉降扩展阶段

20 世纪 80 年代初到 90 年代末这段时期, 北京市地下水开采量相对稳定, 地下水超采区由早期主要集中在城近郊区逐渐向远郊区县扩展, 超采区面积占平原区面积 70% 多。早期形成的沉降区的沉降速率减缓, 新的沉降区形成, 沉降区面积显著扩大。

从 1981 年起, 北京市对城镇地下水采取了包含节水等一系列科学管理措施, 使城近郊区地下水开采量由 20 世纪 70 年代至 80 年代初期的每年 8.5~9.5 亿 m³, 逐渐减少到 20 世纪 80 年代中后期的每年 7.5~8.0 亿 m³。随着开采量的减少, 东郊地区的地下水位下降速度明显减缓, 地面沉降速度也有所减小。但在未实现自来水管网覆盖的东郊边缘地区, 地下水开采量仍不断增大, 出现了新的地下水降落漏斗区, 东郊地面沉降区逐渐向东、向北扩展。在昌平沙河—八仙庄和大兴礼贤—榆垓一带, 新的沉降区形成。到 1987 年底, 平原区累计地面沉降量大于 50 mm 的面积达 1 557 km²。

从 20 世纪 90 年代开始, 地下水开采量相对稳定, 全市每年开采量在 26~28 亿 m³。地下水的采补出现了新一轮的动态平衡, 但是与 20 世纪 60 年代的天然状态比, 累计亏损量仍然比较大。这一时期的地面沉降区面积在稳定增加。到 1999 年底, 平原区形成了五大大沉降区, 包含朝阳东八里庄—大郊亭、朝阳来广营、昌平沙河—八仙庄、大兴榆垓—礼贤和顺义平各庄, 最大累计沉降量分别达到 722 mm、565 mm、688 mm、661 mm 和 250 mm, 累计沉降量大于 50 mm 的面积达 2 815 km²。

1.4 地下水严重超采阶段和地面沉降快速发展阶段

从 20 世纪 90 年代末至 2010 年, 北京市遭遇了有史以来历时最长的连续枯水年, 大部分年份的降水量低于多年平均降水量。北京市采取了有效的开源节水措施, 加大外调水, 建设应急水源地, 加快推进节水型社会建设, 地下水开采量逐步下降, 从 2000 年的 27.08 亿 m³ 逐渐下降到 2010 年的 21.20 亿 m³, 但是地下水供水量仍占整体供水的 2/3 左右, 地下水储变量比以往更快的速度持续亏损。这个时期的北京地下水处于严重超采状态。从

1999 年到 2010 年是北京地面沉降快速发展阶段。到 2010 年底, 平原区累计地面沉降量大于 50 mm 的面积达 4 281 km², 相比 1999 年, 增加了 1 466 km², 增长速度之快超过以往任何阶段。已形成的沉降区不断向外扩展, 新的沉降中心出现, 如朝阳来广营沉降区金盏—楼梓庄沉降中心自 2007 年连续四年的年沉降速率都超过了 100 m/a, 东八里庄—大郊亭沉降区中出现了三间房、通州城区和台湖—黑庄户三个沉降中心。一些新的沉降区, 如海淀山后西小营—上庄、平谷城区等, 2010 年 InSAR 监测年沉降速率都超过了 60 mm/a。

这一阶段, 北京市遭遇历史上最长的连续枯水年, 地下水开采量稳中有降, 但地下水超采区显著增加, 占平原区面积超过 90%。地面沉降区在快速扩展, 新的沉降中心出现且其年沉降速率达到以往最大沉降速率的四倍多。

北京市地面沉降和地下水开采的时间演变见表 1。通过这种对比分析, 可以发现, 北京市地面沉降的形成发展阶段和地下水开采利用的阶段性变化高度吻合, 地面沉降速率和分布范围与地下水开采强度和布局密切相关。

2 地下水降落漏斗与地面沉降中心区的时空演变

北京市地下水降落漏斗最早形成于 1971 年, 当时的漏斗中心位于东北郊酒仙桥附近, 只是局部的小漏斗。从 20 世纪 70 年代开始, 东郊地区出现了较大的地下水降落漏斗。从 20 世纪 80 年代后期至 90 年代中期, 地下水位降落漏斗面积呈现逐年增加趋势, 漏斗范围由东郊向着通州、顺义和昌平地区逐渐扩大^[11]。从 20 世纪 90 年代后期至今出现了连续的干旱年份, 地下水位普遍下降, 很多地方的水位达到历史最低水平, 地下水降落漏斗仍在逐渐扩展, 平谷地区也出现了地下水降落漏斗。地下水位降落漏斗面积从 1975 年的 250 km² 增加到 2010 年的 1 280 km², 漏斗中心水位埋深也相应的从 23 m 增大到近 44 m(图 1)。

从基于高精度水准测量获得的累计沉降量分布图可以看出, 1966 年—1983 年的地面沉降中心区(本文中特指“大兴区以北累计沉降量 ≥100 mm 的地区”)与 1973 年的主采层地下水漏斗范围吻合非常好(图 2), 累计沉降量最大点(>400 mm)也位于漏斗内。1955 年—1999 年的地面沉降中心区与同时期的地下水漏斗扩张方向一致(图 3), 即向东(通州)、东北(顺义)、西北(昌平)扩展。到 2010 年, 地

表 1 北京市地下水开采与地面沉降的时间演化对比

Tab. 1 Time evolution contrast between groundwater exploitation and land subsidence in Beijing

时间	地下水开采		地面沉降	
	阶段	特征	阶段	特征
50 年代-70 年代初	初步开发	开采量小, 年均开采量约为 10 亿 m ³ /a。采补基本平衡, 城近郊局部地区出现超采。	形成	在地下水超采的东郊和东北郊地区出现地面沉降, 年沉降速率在几毫米到二十几毫米。累计沉降量大于 50 mm 的区域面积约为 400 km ² 。
20 世纪 70 年代中期-80 年代初	开采增加	开采量在 25~28 亿 m ³ /a。地下水呈负均衡, 储变量亏损逐年连续增大。城近郊区严重超采。	发展	东郊地面沉降区发展扩大, 形成大郊亭和来广营两个沉降中心。沉降速率在 18~30 mm/a, 累计沉降量大于 50 mm 的区域面积约为 600 km ² 。
80 年代初-90 年代末	开采控制	地下水开采相对稳定, 年均开采量约为 26 亿 m ³ /a。地下水采补出现新一轮的动态平衡, 但与 60 年代的自然状态相比, 累计储变量仍亏损。东郊地区开采量减少, 其它郊区县开采量增加。地下水超采区占平原区面积超过 70%。	扩展	形成了五大沉降区: 朝阳东八里庄-大郊亭、朝阳来广营、昌平沙河-八仙庄、大兴榆垓-礼贤和顺义平各庄。东郊和东北郊地面沉降区沉降速度减缓, 年沉降速率小于 20 mm/a。昌平沙河-八仙庄和大兴礼贤-榆垓沉降区沉降中心最大沉降速率在 19~24 mm/a。累计沉降量大于 50 mm 的区域面积约为 2 815 km ² 。
20 世纪 90 年代末-2010 年	严重超采	地下水开采量稳中有降, 从 2000 年的 27.08 亿 m ³ 下降到 2010 年的 21.20 亿 m ³ 。但连续十年干旱, 地下水仍呈负均衡, 地下水超采区占平原区面积超过 90%。	快速发展	老沉降区内出现了新的沉降中心, 年沉降速率连续四年超过 100 mm/a。新的沉降区包括海淀山后西小营-上庄和平谷城区, 2010 年 InSAR 监测沉降速率都超过了 60 mm/a。累计沉降量大于 50 mm 的区域面积约为 4 281 km ² 。

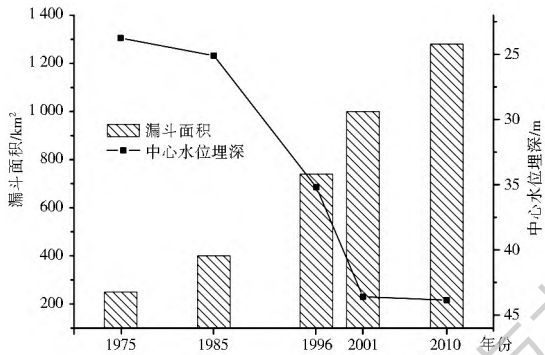


图 1 北京平原区地下水降落漏斗发展趋势

Fig. 1 The development trend of groundwater depression cone in Beijing plain area

连续超过的 100 mm/a 的局部沉降量最大点都位于地下水漏斗范围内。

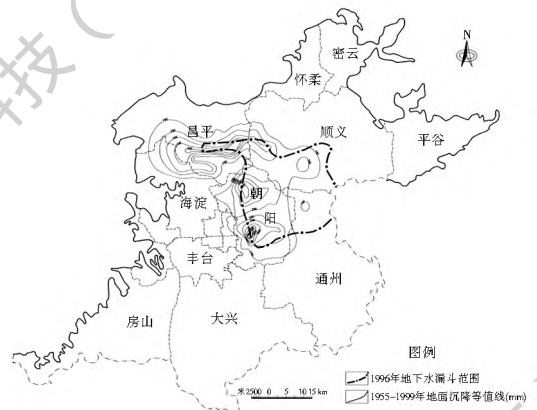


图 3 主要开采层地下水漏斗(1996 年)和地面沉降中心区(1995 年-1999 年)对比

Fig. 3 The contrast between groundwater depression cone(1996) and land subsidence center area(1995-1999)

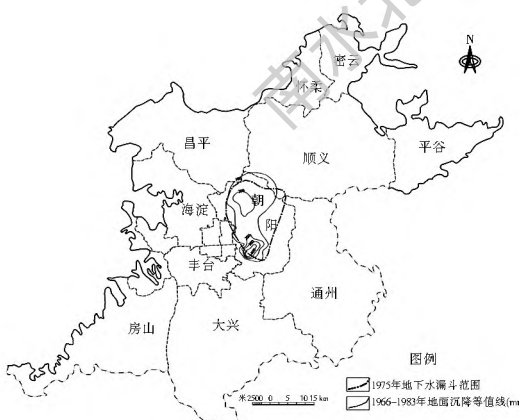


图 2 主要开采层地下水漏斗(1973 年)和地面沉降中心区(1966 年-1983 年)对比

Fig. 2 The contrast between groundwater depression cone(1973) and land subsidence center area(1966-1983)

下水降落漏斗朝顺义和朝阳南部地区扩展最为明显(图 4), 地面沉降中心区相比于 1999 年继续朝东北(顺义、平谷)、东南(通州)和西北(昌平)方向扩展, 面积增加 1 倍多, 朝阳和通州区近三年来来沉降速率



图 4 主要开采层地下水漏斗(2010 年)和地面沉降中心区(1995 年-2010 年)对比

Fig. 4 The contrast between groundwater depression cone(2010) and land subsidence center area(1995-2010)

3 地下水主采层与地面沉降主压缩层的变化

2000 年以前,北京地区农业用水开采层集中在 80~100 m,工业和城镇生活用水开采层主要集中在 80~200 m 或 100~200 m,200~300 m 的深层承压水开采量较小,顶板埋深大于 300 m 的深层承压水尚未开发利用。以 2000 年为例,80~100 m 以上开采段的开采量为 12.43 亿 m³/a,以下开采段的开采量为 5.92 亿 m³,分别占总开采量的 68% 和 32%。在北京平原中下部的大部分地区,从地表至埋深 80~100 m 为全新统、上更新统地层,地层压缩性相对较高,属地下水农业开采层,开采程度较高。以往据此认为,100 m 以浅土体是地面沉降的主要贡献层^[18]。100~280 m 为中更新统沉积层,土体压缩性较低,为次要贡献层。

与 2000 年以前相比,当前北京市平原区地下水开采层位发生了明显变化。由于平原区浅部含水层水位的持续下降以及水质恶化,因此地下水开采层位和开采深度整体上向地表以下更深层发展,除局部地区工程施工排水外,潜水开采量几乎为零,地下水开采类型也由原来的以潜水或浅层承压水为主转变为中深层承压水为主。以近三年年沉降速率均超过 100 mm/a 的朝阳区东南郊某乡为例,该地区 2011 年共有水井 127 眼,其中井深 < 100 m、100~200 m 和 > 200 m 的井数分别为 78 眼、23 眼和 26 眼,年开采量分别为 22 万 m³、91 万 m³ 和 58 万 m³。从图 5 可以看出,尽管井深 100 m 以内的水井数量占比 61.42%,但其年开采量仅占 12.87%,而井深在 100~200 m 的水井数量虽仅占 18.11%,但其年开采量占比达到 53.22%。可见该地区的中深层和深层含水层已经成为主要的开采层。

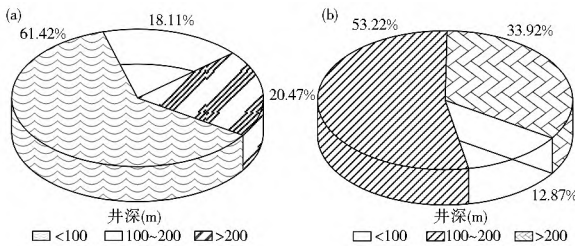


图 5 朝阳区东南郊某乡镇开采井 2011 年 (a) 井数百分比和 (b) 年开采量百分比

Fig. 5 Relative proportions of the number of mining Wells (a) and its groundwater withdrawal (b) for a town in Chaoyang district (2011)

开采层的变化导致不同埋深含水层水位也出现了相应的变化。该区内 612 号和 204 号分层观测井 (图 6) 水位动态曲线显示,100 m 以浅含水层年均水位保持相对稳定状态甚至有小幅回升,而 100 m

以深含水层水位均出现了不同程度的下降,且含水层埋深越大,水位降幅越大。

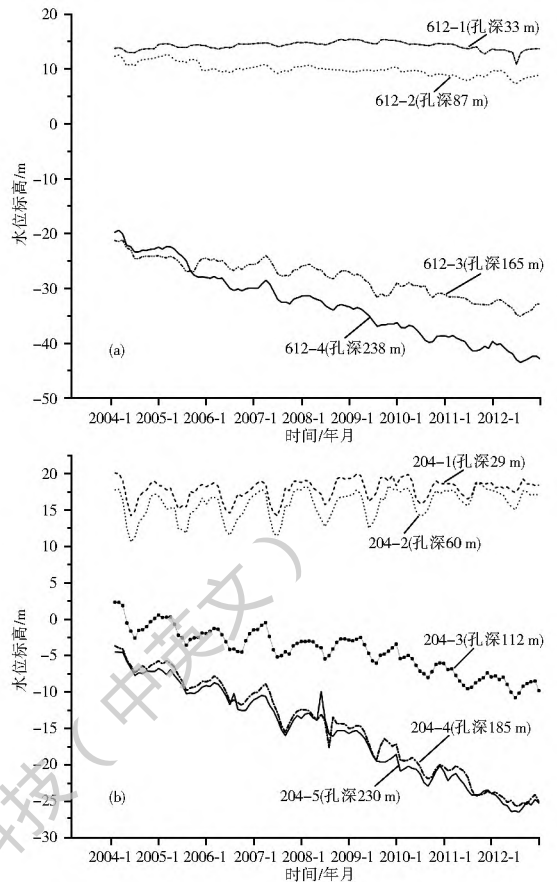


图 6 分层观测井 612 号 (a) 和 204 号 (b) 地下水位动态曲线
Fig. 6 Layered dynamic curves of groundwater level in No. 612 (a) and No. 204 (b) observation Wells

伴随着地下水开采层位的变化,通过地面沉降监测站内分层标长时间序列数据可以发现地面沉降不同压缩层位的沉降贡献比例发生了显著变化:平原区绝大部分地区地面沉降的主要贡献层已经从 100 m 以浅转移到 100 m 以深的地层。表 2 是自 2004 年开始监测的北京市首批建设的三个地面沉降监测站内 100 m (左右) 上下地层历年沉降比重变化。

表 2 地面沉降监测站 100 m (左右) 上下地层历年沉降比重变化 (2005 年-2012 年)

Tab. 2 Proportions of land subsidence at three monitoring stations with depth of around 100 m (2005-2012)

监测站	监测层位 / m	监测层沉降量占地面标沉降量比重 (%)							
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
F1	0~102	54.2	46.3	42.76	30.99	25.11	50.70	37.06	25.35
	>102	45.8	53.6	57.24	69.01	74.89	49.30	62.94	74.65
F2	0~99	46.8	46.9	55.12	38.37	29.48	32.79	40.39	26.05
	>99	53.2	53.1	44.88	61.63	70.52	67.21	59.61	73.95
F3	0~94	53.5	48.6	74.21	35.29	29.60	30.40	31.07	33.74
	>94	46.5	51.4	25.79	64.71	70.40	69.60	68.93	66.26

从监测初期的2005年以来,这三个站100 m(左右)上下地层在地面沉降总量中的比重变化呈现出相同的特点:100 m以深地层的沉降量占总沉降量的比重总体呈增大趋势,从2005年50%左右上升到2012年的70%左右。这一变化表明引起沉降的主要层位已向深部地层转移,同时也力证了北京地面沉降的主要压缩层变化与地下水开采层位的显著相关性。

4 讨论

北京平原区地面沉降形成发展阶段与地下水开发利用阶段的对应、地面沉降中心区与地下水降落漏斗两者时空演变的相关性以及地面沉降主压缩层随地下水主采层变化而发生的转移,显示了北京平原区与其他不同地质环境模式下地面沉降对过量开采地下水响应的共性。

除了上述抽水型地面沉降的共有特征外,北京地面沉降的平面分布还明显受控于地质结构,表现出了冲洪积平原模式的特性。北京平原区主要是在五大河流(永定河、潮白河、温榆河、大石河、蓟运河)冲、洪(湖)积作用下形成的。从冲洪积扇顶部至冲洪积平原地区,含水层颗粒由粗变细,结构由单层逐渐过渡到多层,在平面上可划分为单一结构区和多层结构区。地面沉降区基本与含水层多层结构区的分布相吻合,累计地面沉降量大于50 mm的地区主要分布在冲洪积扇中下部地区。冲洪积扇中上部地区含水层富水性好,建设有多个北京市重要的水源地。以建于潮白河冲洪积扇中上部的怀柔应急水源地为例,自2003年并网运行到2009年底,在怀柔和顺义交界地带已经形成了一个大型地下水降落漏斗,地下水位平均累计降深超过20 m^[19],但并未像在冲洪积扇中下部地区抽水那样而出现明显的地面沉降。

因此,针对风险评价做出的地面沉降重点防治区^[20],控制地下水开采从而遏制地下水位的下降趋势,是减缓地面沉降最快最有效的方式。特别是重点防治区内的高速铁路等对差异沉降比较敏感的工程,要研究其致灾阈值,必要时将地下水开采调整方案细化落实至不同区域、不同层位、不同用途的具体开采井上^[21],在南水进京后,优先置换影响区内的自备井^[22]。另一方面,在地面沉降风险性低的冲洪积扇顶部实施地下水调蓄工程^[23],涵养恢复地下水资源,增强供水能力,减少地面沉降重点防治区内的地下水开采量。

5 结论

(1) 北京地面沉降的形成演化具有抽水型地面沉降的一般特征,其形成、发展、扩展及快速发展阶段分别与地下水开发利用的初步开发、开采增加、开采控制和严重超采阶段相对应,地面沉降中心区和地下水降落漏斗的时空演变高度相关,地面沉降主压缩层随地下水主开采层变化而向深部地层转移。

(2) 北京地面沉降的发生发展表现出了冲洪积平原地质模式的特性,即地面沉降区基本与地下水多层结构区的分布相吻合,累计地面沉降量大于50 mm的地区主要分布在冲洪积扇中下部地区。

(3) 在地面沉降风险性大的重点防治区,限制地下水开采从而遏制地下水位的下降趋势,是减缓地面沉降最快最有效的方式。

参考文献(References):

- [1] 殷跃平,张作辰,张开军.我国地面沉降现状及防治对策研究[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(2):1-8.(YIN Yueping, ZHANG Zuochen, ZHANG Kaijun. Land subsidence and countermeasures for its prevention in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 1-8. (in Chinese))
- [2] 张维然,王仁涛.2001-2020年上海市地面沉降灾害经济损失评估[J].水科学进展,2005,16(6):870-873.(ZHANG Weiran, WANG Renta. Risk evaluation of the economic losses induced by land subsidence in Shanghai from 2001 to 2020[J]. Advances In Water science, 2005, 16(6): 870-873. (in Chinese))
- [3] 陈正松,罗志才,李琼.上海地区地面沉降原因分析[J].大地测量与地球动力学,2009,29(增刊):90-94.(CHEN Zhengsong, LUO Zhicai, LI Qiong. Analysis of cause of land subsidence in Shanghai[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(sup.): 90-94. (in Chinese))
- [4] 张落成,陈振光,吴楚材.苏南太湖流域地下水过度开采引起的地面沉降及其防治对策[J].湖泊科学,2003,15(3):257-262.(ZHANG Luocheng, CHEN Zhen Guang, WU Chucai. Land subsidence problem and its control in Taihu basin of South Jiangsu Province due to overexploitation of underground water[J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(3): 257-262 (in Chinese))
- [5] 杨艳,贾三满,王海刚.北京平原区地面沉降现状及发展趋势分析[J].上海地质,2010,31(4):23-28.(YANG Yan, JIA Saman, WANG Haigang. The status and development of land subsidence in Beijing Plain[J]. Shanghai Geology, 2010, 31(4): 23-28. (in Chinese))
- [6] 潘云,潘建刚,宫辉力,等.天津市地下水开采与地面沉降关系研究[J].地球与环境,2004,32(2):36-39.(PAN Yun, PAN Jiangan, GONG HuiLi, et al. Research on the relation between groundwater exploitation and subsidence in Tianjin

- proper[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(2): 36-39. (in Chinese)
- [7] 张文杰. 沧州市地面沉降与开采地下水关系初探[J]. *地下水*, 2010, 32(6): 41-42. (ZHANG Wenjie. Research on the relationship between land subsidence and groundwater in Cangzhou City [J]. *Groundwater*, 2010, 32(6): 41-42. (in Chinese))
- [8] 杨欢, 石坚. 西安市地面沉降机理分析[J]. *地下水*, 2013, 35(4): 60-62. (YANG Huan, SHI Jian. Study on mechanism of land subsidence in Xi'an [J]. *Groundwater*, 2013, 35(4): 60-62.) (in Chinese)
- [9] 闫世龙, 王焰新, 马腾, 等. 内陆新生代断陷盆地地面沉降机理及模拟——以山西省太原市为例[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006: 59-67. (YAN Shi long, WANG Yan xin, MA Teng, et al. The mechanism and simulation of land subsidence in the cenozoic down faulted basin zone: Taiyuan City in Shanxi Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006: 59-67. (in Chinese))
- [10] 薛禹群, 张云, 叶淑君, 等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 585-593. (XUE Yu qun, ZHANG Yun, YE Shu jun, et al. Land subsidence in China and its problems [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 585-593. (in Chinese))
- [11] 祝意青, 王庆良, 徐云马, 等. 西安市地面沉降时空演化特征及机理研究[J]. *地球学报*, 2005, 26(1): 67-70. (ZHU Yi qing, WANG QING-liang, XU Yun ma, et al. A study of the space time change characteristics of ground subsidence in Xi'an and their mechanism [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(1): 67-70. (in Chinese))
- [12] Devin Galloway, David R. Jones, S. E. Ingebritsen. Land Subsidence in the United States Circular 1182 [R]. U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, 1999: 35-41.
- [13] P Teatini, M Ferronato, G Gambolati, et al. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(1), W01406.
- [14] 陈蓓蓓, 宫辉力, 李晓娟, 等. 北京地下水系统演化与地面沉降过程[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2012, 42(1): 373-379. (CHEN Bei bei, GONG Hui li, LI Xiao juan, et al. Groundwater system evolution and land subsidence process in Beijing [J]. *Journal Of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(1): 373-379. (in Chinese))
- [15] 田芳, 郭萌, 罗勇, 等. 北京地面沉降区土体变形特征[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 236-241. (TIAN Fang, GU O Meng, LUO Yong, et al. The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing [J]. *Geology in China*, 2012, 39(1): 236-241. (in Chinese))
- [16] 郭萌, 田芳, 王荣, 等. 北京市地面沉降控沉目标分析[J]. *城市地质*, 2013, 8(3): 1-5. (GUO Meng, TIAN Fang, WANG Rong, et al. The analysis of control targets for land subsidence in Beijing [J]. *Urban Geology*, 2013, 8(3): 1-5. (in Chinese))
- [17] 张安京, 叶超, 李宇, 等. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 1-3. (ZHANG An jing, YE Chao, LI Yu, et al. Beijing Groundwater [M]. Beijing: China Land Press, 2008: 1-3. (in Chinese))
- [18] 贾三满, 郭萌, 叶超, 等. 北京市地面沉降监测网站预警预报系统(一期)工程地面沉降调查报告[R]. 北京: 北京市水文地质工程地质大队, 2004. (JIA San man, GU O Meng, YE Chao, et al. Survey report of the first phase project of early warning and forecasting system of land subsidence in Beijing [R]. Beijing: Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, 2004. (in Chinese))
- [19] 迈德顺, 任宇, 李世君, 等. 怀柔应急水源地开采动态分析及续采对策研究[J]. *北京水务*, 2011, (2): 38-40. (BIAN De shun, REN Yu, LI Shi jun, et al. Analysis of the production behavior and continued mining strategy of huairou emergency groundwater well field [J]. *Beijing Water*, 2011, (2): 38-40. (in Chinese))
- [20] 姜媛, 贾三满, 王海刚. 北京地面沉降风险评价与管理[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2012, 23(1): 55-60. (JIANG Yuan, JIA San man, WANG Hai gang. Risk assessment and management of land subsidence in Beijing Plain [J]. *The Chinese journal of geological hazard and control*, 2012, 23(1): 55-60. (in Chinese))
- [21] 王荣, 杨艳, 田芳, 等. 高速铁路区域地面沉降监测体系构建[J]. *上海国土资源*, 2014, 35(2): 17-19. (WANG Rong, YANG Yan, TIAN Fang, et al. Construction of a monitoring system for regional land subsidence affecting high speed railways [J]. *Shanghai land & resources*, 2014, 35(2): 17-19. (in Chinese))
- [22] 韩丽, 来海亮, 郑凡东. 南水北调引水进京后自备井供水置换规划探讨[J]. *给水排水动态*, 2013, (3): 16-19. (HAN Li, LAI Hai liang, ZHENG Fan dong. A discussion of self prepare wells replacement planning after the South to North Water Diversion into Beijing [J]. *Water & Wastewater Information*, 2013, (3): 16-19. (in Chinese))
- [23] 李宇, 邵景力, 叶超, 等. 北京西郊地下水库模式研究[J]. *地学前缘*, 2010, 17(6): 192-199. (LI Yu, SHAO Jing-li, YE Chao, et al. A discussion on the patterns of groundwater reservoir in the west suburb of Beijing [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 192-199. (in Chinese))