



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.023

杨丽萍, 周志华. 地面沉降与地下水开采相关关系及沉降预测[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 132-137. YANG Li ping, ZHOU Zhi hua. Correlation between land subsidence and groundwater exploitation and forecast of land subsidence[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 132-137. (in Chinese)

地面沉降与地下水开采相关关系及沉降预测

杨丽萍, 周志华

(天津市水利科学研究院, 天津 300061)

摘要: 对天津市中心城区、塘沽区、汉沽区和大港区 1980 年-2013 年的地下水开采量、地面沉降量进行数据统计分析, 建立了各区域的累计地面沉降量和累计地下水开采量的线性相关关系模型, 验证结果表明, 此相关性模型模拟累计地面沉降量时误差较小。根据实际情况, 设计三种地下水开采方案, 利用该模型对 2014 年-2020 年各区域的地面沉降量进行了预测, 发现方案 3 为最优地下水开采方案, 较方案 1 年沉降量和累计沉降量降低比率分别为 68.29% 和 5.47%, 较方案 2 年沉降量和累计沉降量降低比率分别为 65.65% 和 4.97%。在南水北调天津输水工程通水后, 采用方案 3 将会大幅减缓天津市地面沉降速率, 有效遏制地面沉降的发展。

关键词: 地面沉降; 地下水开采量; 相关关系; 南水北调; 预测

中图分类号: P641; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0132-06

Correlation between land subsidence and groundwater exploitation and forecast of land subsidence

YANG Li ping, ZHOU Zhi hua

(Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: The excessive exploitation of groundwater is the main cause of land subsidence in Tianjin. By analyzing the groundwater exploitation and land subsidence data from 1980 to 2013 of the central area of Tianjin, Tanggu, Hangu and Dagang District, the correlation model of the cumulative amount of land subsidence and groundwater exploitation was established. The results showed that the error was small when the model simulated the cumulative amount of land subsidence. On this basis, combined with the actual situation, 3 groundwater extraction plans were designed to forecast the regional land subsidence from 2014 to 2020. The results showed that the scheme 3 was the optimum groundwater exploitation scheme, the reduction ratios of the year settlement and cumulative settlement between scheme 3 and 1 were about 68.29% and 5.47%, and were 65.65% and 4.97% between scheme 3 and 2. In addition, the rate of land subsidence would significantly reduce when the South to North Water Diversion Project was carried out.

Key words: land subsidence; volume of groundwater exploitation; correlation; South to North Water Diversion Project; forecast

在自然和人为因素的影响下, 地壳表层土体受外力产生压缩变形, 引起区域地面标高降低, 造成高程资源的丧失和土地可利用性的损失, 这种地质灾害称为地面沉降^[1]。目前, 全国 70 多个地区均发生过

不同程度的地面沉降灾害, 而天津市是我国地面沉降最严重的城市之一, 也是北方规模最大的地面沉降发生地区^[2]。天津市地面沉降最早发现于 20 世纪 50 年代末, 主要是宝坻城关以南的平原区, 面积

收稿日期: 2015-11-14 修回日期: 2016-03-10 网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1135.017.html>

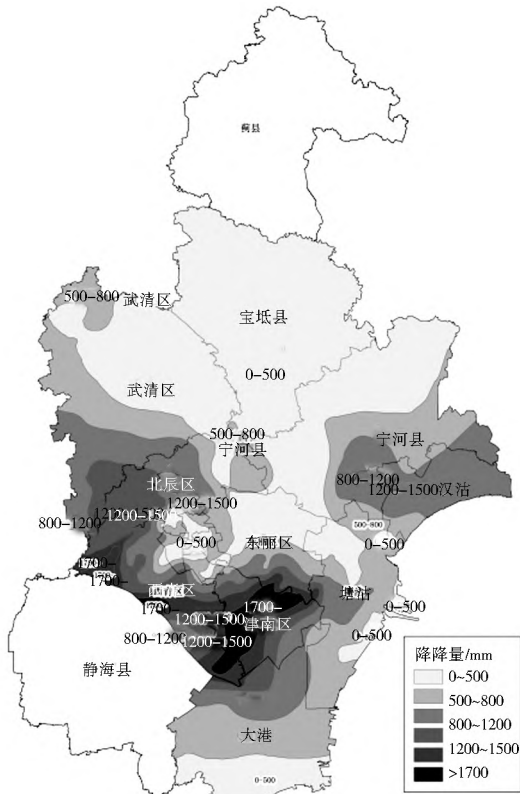
基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费(201301069)

Fund: Special Funds for Public Industry Research Projects of the National Ministry of Water Resources(201301069)

作者简介: 杨丽萍(1982-), 女, 河北人, 工程师, 主要从事防洪减灾方面研究。E-mail: ylp@163.com

达 9 538 km²。在这广阔的沉降范围内,分别形成了中心城区、滨海新区(包括塘沽、汉沽、大港)等几个沉降漏斗。随后的几十年里,随着各级漏斗的累计沉降量的增加(图 1),地面沉降对天津市经济社会发展和生态环境保护造成了诸多不利影响^[3]。

天津市多年地面沉降研究结果和中心城区地面沉降防治的经验表明,地下水资源的不合理开发利用是引发天津地面沉降的最主要原因,因此研究天津市地下水开采量对沉降的影响势在必行。本文主要通过分析地下水开采量和地面沉降量的相关性,来进行地面沉降趋势预测。



注:蓟县位于天津市北部,地面累计沉降量较微小,静海县大规模地面沉降观测起始时间较晚,无法与图中其他区域统一,因此这两个区域未纳入本图。

图 1 天津市部分区域 1985 年-2013 年地面累计沉降量等值线

Fig. 1 The isoline map of accumulative land subsidence from 1985 to 2013 in Tianjin

1 研究区地下水开采状况

天津市地下水资源开发始于 1925 年,至今已有近 90 年历史。从建国初期的 51 眼机井发展到目前的 15 122 眼,地下水开采利用量达到 5.49 亿 m³/a, 约占全市总用水量的 1/4, 为全市的工农业生产发展和城乡居民生活提供了必要的水源,对保障国民经济发展和提高人民生活水平起到了十分重要的作用,但是大量超采地下水带来了严重的地面沉降

灾害^[4]。

(1) 中心城区。天津市中心城区 1985 年以前大量开采深层地下水,年开采量约 9 690 万 m³/a,超采量大,出现地下水位大幅度下降和地面沉降。1983 年引滦入津工程通水,缓解了天津市区的城市供水紧张局面。自 1985 年天津市连续实施了四期《三年控制地面沉降实施计划》,封停机井、压采地下水,使水位下降和地面沉降得到缓解。2009 年,中心城区先期完成了地下水用户的水源转换工作。截止目前,环城四区目前有机井 2 790 眼,合计开采地下水 6 001.6 万 m³/a^[56]。

(2) 滨海新区。滨海新区包括塘沽区、汉沽区和大港区。塘沽区在引滦入塘前大量开采深层地下水,1985 年地下水开采量达 3 000 万 m³,超采量在 1 倍以上,造成地下水位大幅下降和地面沉降,20 世纪 80 年代后期实施引滦入塘后水位开始回升。汉沽区工农业用水主要靠开采地下水,深层淡水一直处于超采状态。大港区目前外调水源不足,工农业和生活用水主要靠开采深层地下水,深层地下水一直处于超采状态,尤以城市规划控制范围最为严重。截止目前,滨海新区目前有机井 2 191 眼,合计开采地下水 7 186.69 万 m³/a^[78]。

(3) 两区两县。其余开采地下水的区域主要分布于宝坻区、武清区、宁河县和静海县。截止目前,两区两县目前有机井 10 141 眼,合计开采地下水 15 588.61 万 m³/a。

本文的研究范围主要涉及天津市中心城区和滨海新区(包括塘沽区、汉沽区和大港区)。

2 地面沉降与地下水开采相关关系

2.1 模型理论

一般情况下,沉降量与地下水年开采量之间相关性差,但逐年累计沉降量与地下水逐年累计开采量间相关性很好,通过累计沉降量和累计开采量之间的一元相关分析,可以克服地下水开采量和沉降量间的滞后性,并减小数据的零散程度、突出规律性。据此建立两者之间的相关方程:

$$\Sigma S = a \Sigma Q + b \quad (1)$$

式中: S 为逐年累计沉降量(mm); Q 为逐年累计地下水开采量(万 m³); a 为常数项; b 为回归系数。

根据多年的地面沉降量和地下水开采量的观测累计值,利用最小二乘法原理,能够确定上述一元相关分析模型参数。模型建立后,与实际数据是否有较好的拟合度,线性关系是否具有显著性,可以通过数理统计进行检验。常用的统计检验为 R 检验:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \hat{s}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}} \quad (2)$$

式中: R 为复相关系数, 用来测定回归模型的拟合程度, 其取值范围为 $0 < |R| \leq 1$ 。 R^2 为判定系数, 其值越大, 说明线性关系越显著^[9-11]。

3.2 模型验证

为研究地面沉降与地下水开采的相关性, 本文利用 1980 年- 2013 年地下水开采量和地面沉降值计算天津市中心城区、塘沽区、汉沽区和大港区逐年累计沉降量和累计开采量, 见图 2 和图 3。

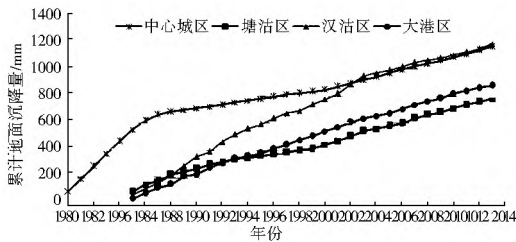


图 2 中心城区与滨海新区累计地面沉降量
Fig. 2 The accumulative land subsidence of the central area and Binhai new area

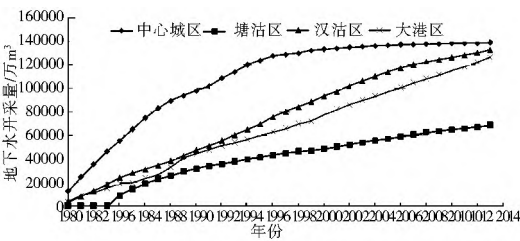


图 3 中心城区与滨海新区累计地下水开采情况
Fig. 3 The groundwater exploitation of the central area and Binhai new area

以中心城区及滨海新区 1980 年- 2013 年的累积地面沉降量和累积地下水开采量为研究所采用的一系列观测值。逐年累积地下水开采量为 Q_i 量(万 m^3), 逐年累积地面沉降量为 S_i (mm), $i = 34$ 。根据上述数据计算出线性回归方程的回归系数 a 、 b , 建立累积地下水开采量和累积地面沉降的线性相关方程。结果见表 1。

表 1 累积地下水开采量和累积地面沉降量回归分析结果

Tab. 1 Results of regression analysis between the cumulative volume of groundwater

监测区域	回归系数		相关方程	判定系数 R^2
	a	b		
中心城区	0.006	57.1	$S_1 = 0.006Q_1 + 57.1$	0.908
塘沽区	0.012	- 12.3	$S_2 = 0.012Q_2 - 12.3$	0.976
汉沽区	0.009	104.3	$S_3 = 0.009Q_3 + 104.3$	0.992
大港区	0.007	59.25	$S_4 = 0.007Q_4 + 59.25$	0.996

将 1980 年- 2013 年的各监测区域的累积地下水开采量代入相应回归方程, 可得各年度的累积地面沉降量, 与实际累计沉降量进行比较, 结果见图 4。

将上述四个区域年沉降量和累计沉降量模拟结果与实际监测的数据进行误差分析, 其结果见表 2 所示。可以看出, 利用相关性模型模拟的年度地面沉降量效果不理想, 总体误差大, 其中只有 11.9% 的数据拟合的误差率在 10% 以内。利用相关性模型模拟的累计地面沉降量效果较好, 其中 62.4% 的数据误差在 10% 以内, 34.3% 的数据误差在 10%~30%, 误差率 30% 以上的数据仅有 5.1%。

表 2 相关性模型模拟结果误差分析

Tab. 2 The error analysis of simulation results of the model

区域	误差率					
	< 10%	10% ~ 30%	30% ~ 50%	50% ~ 100%	> 100%	
年沉降量	中心城区	2.9	17.6	11.8	47.1	20.6
	塘沽区	13.8	27.6	37.9	13.8	6.9
	汉沽区	6.9	41.4	37.9	13.8	0.0
	大港区	24.1	24.1	37.9	13.8	0.0
	平均	11.9	27.7	31.4	22.1	6.9
累计沉降量	中心城区	58.8	38.2	2.9	0.0	0.0
	塘沽区	82.8	10.3	6.9	0.0	0.0
	汉沽区	66.7	33.3	3.7	3.7	0.0
	大港区	41.4	55.2	3.4	0.0	0.0
	平均	62.4	34.3	4.2	0.9	0.0

通过上述分析可得到, 相关性模型在模拟年度地面沉降量时误差大, 模拟累计地面沉降量时误差小, 可以认为模型适用于以累计地下水开采量为参数的累计地面沉降量的模拟。

3 地面沉降趋势预测

天津市中心城区从 2011 年开始已实现地下水全部禁采。根据《天津市地面沉降防治规划(2011 年- 2020 年)》^[12] 和《天津市地下水压采实施方案》^[13], 从 2013 年开始将按照先城区后农村、先严重超采区后一般超采区、先生产用水后生活用水的原则, 逐步安排深层孔隙地下水水源转换工作, 并将滨海新区作为水源转换的重点工作区域。2014 年天津市实现南水北调通水, 由于大量替代水源的出现, 天津市深层地下水开采量大幅减少, 整体供水形势发生巨大变化。本文根据今后几年天津市外调水源和地下水开采的情况, 设计三种地下水开采方案(见表 3), 采用地面沉降与地下水开采量相关性模

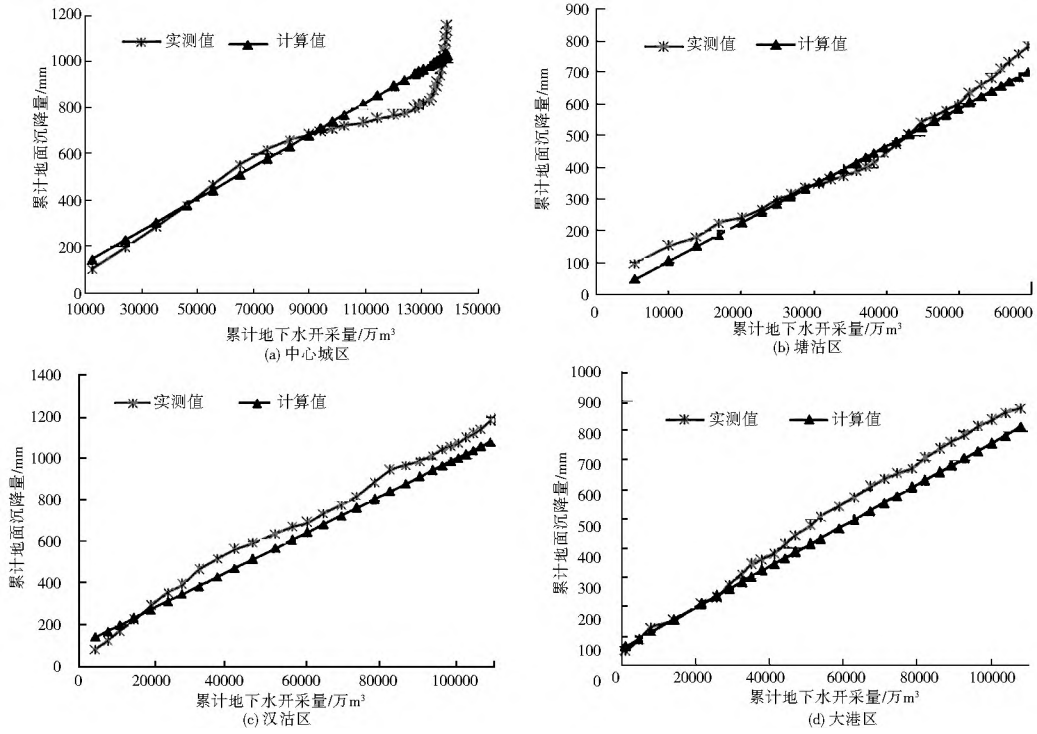


图 4 累计地面沉降情况实测值与计算值对比

Fig. 4 Comparison of measured and calculated values of cumulative subsidence

型方法分别对塘沽区、汉沽区和大港区的累计地面沉降量进行预测。模型输入为累计地下水开采量,模型输出为累计地面沉降量,并计算年度的沉降量。预测结果见图 6- 图 8。

表 3 地下水开采方案设计

Tab. 3 Design of groundwater exploitation plan

序号	方案设计	预测目标
1	维持 2013 年地下水开采量不变,塘沽区、汉沽区、大港区 2013 年地下水开采量分别为 1 342 万 m ³ 、2 374 万 m ³ 、4 310 万 m ³ , 预测 2014 年- 2020 年地面沉降值。	预测最不利情况下的地面沉降发展状态
2	以 2013 年地下水开采量为基准,逐年降低 2%, 预测 2014 年- 2020 年地面沉降值。	预测没有外来水源,保持现在控沉措施条件下地面沉降发育状况
3	以 2013 年地下水开采量为基准,结合滨海新区今后几年的压采方案(见表 4), 预测 2014 年- 2020 年地面沉降值。	预测南水北调水源利用以后地面沉降发展状态

预测结果显示,方案 1 和方案 2 情况下地面沉降趋势将进一步加大,其中若采用方案 1,到 2020 年塘沽区、汉沽区和大港区的年均沉降量与现状变化不大,而累计沉降量将分别达到 815.05 mm、1 232.29 mm 和 1 024.82 mm。在考虑地下水压采即方案 3 情况下,塘沽区、汉沽区和大港区的年沉降量分别下降到 7.5 mm、0.92 mm 和 0.79 mm,同时到 2020 年累计沉降量分别为 759.67 mm、1 113.13 mm 和 868.57 mm。从表 5 可以看出,方案 3 较方案 1 年

表 4 滨海地区地下水压采方案

Tab. 4 The compressive exploitation plan of underground water in coastal area

区县	年份	计划压采量 / 万 m ³	允许开采量 / 万 m ³
塘沽区	2014	339.83	1 002.17
	2015	351.5	650.67
	2016	25.4	625.27
	2017	0	625.27
	2018	0	625.27
	2019	0	625.27
汉沽区	2014	921.5	1 452.5
	2015	481.95	970.55
	2016	424.81	545.74
	2017	443.47	102.27
	2018	0	102.27
	2019	0	102.27
大港区	2014	1 125.56	3 184.44
	2015	972.67	2 211.77
	2016	213.76	1 998.01
	2017	0	113.52
	2018	0	113.52
	2019	0	113.52
2020	0	113.52	

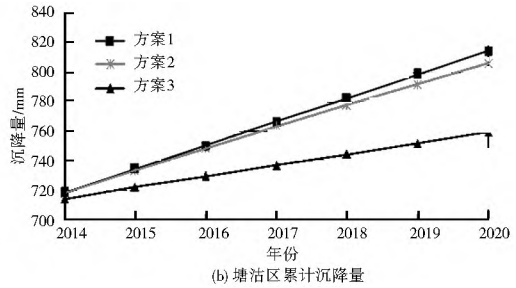
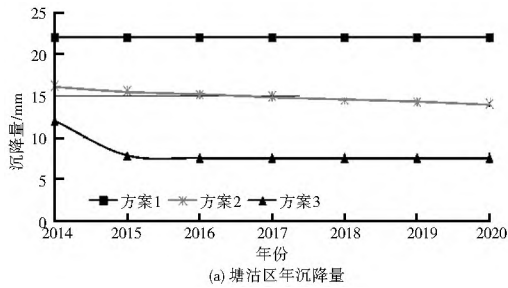


图 6 塘沽区沉降量预测

Fig. 6 Ground subsidence prediction of Tanggu

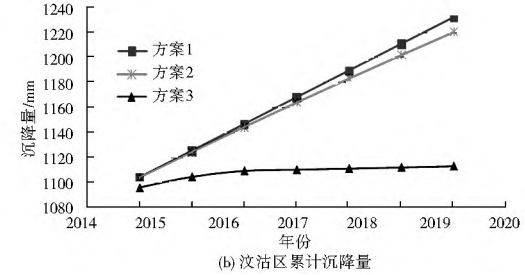
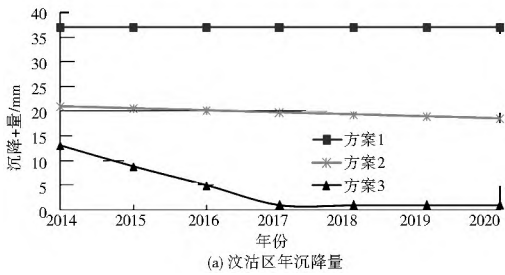


图 7 汉沽区沉降量预测

Fig. 7 Ground subsidence prediction of Hangu

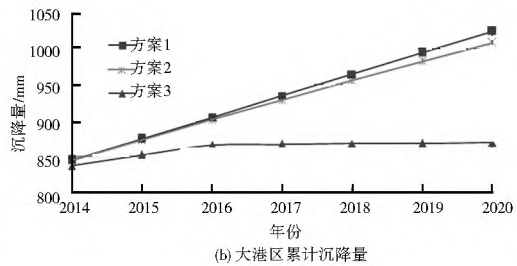
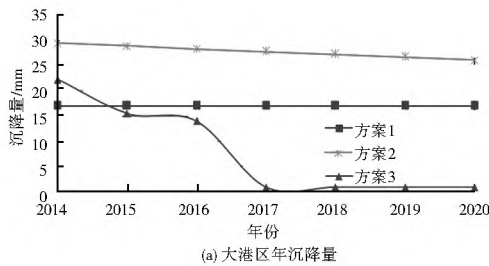


图 8 大港区沉降量预测

Fig. 8 Ground subsidence prediction of Dagang

沉降量降低比率约 68.29%，累计沉降量降低比率约 5.47%；方案 3 较方案 2 年沉降量降低比率约 65.65%，累计沉降量降低比率约 4.97%。因此，南水北调天津输水工程通水后将大幅减缓天津市的地面沉降速率，对于遏制沉降地质灾害的进一步发展起到至关重要的作用。

表 5 方案 3 与方案 1、方案 2 比较

Tab. 5 Comparison between Scheme 3 and Scheme 1, Scheme 2

区域	方案 3 较方案 1 降低比率 (%)		方案 3 较方案 2 降低比率 (%)	
	年沉降量	累计沉降量	年沉降量	累计沉降量
塘沽区	62.77	3.78	45.30	3.32
汉沽区	88.27	5.03	78.77	4.64
大港区	53.85	7.60	72.89	6.95
均值	68.29	5.47	65.65	4.97

4 结论

(1) 地面沉降与地下水开采量相关性模型在模

拟年度地面沉降量时误差较大，而模拟累计地面沉降量时误差较小，因此此模型较适用于以累计地下水开采量为变量的累计地面沉降量的模拟。

(2) 根据三种不同的地下水开采方案下 2014 年 - 2020 年地面沉降量的预测结果，方案 3 最优，其较方案 1 年沉降量降低比率约 68.29%，累计沉降量降低比率约 5.47%；较方案 2 年沉降量降低比率约 65.65%，累计沉降量降低比率约 4.97%。即南水北调天津输水工程通水后，若采用方案 3 将大幅降低天津市地面沉降速率。因此应尽快进行其他区域水源转换，严格控制地下水开采，以有效遏制地面沉降的发展。

参考文献 (References):

[1] 段晓峰, 许学工, 王若柏. 天津沿海地区地面沉降及其影响因素 [J]. 北京大学学报, 2014, 50(6): 1071-1076. (DUAN Xiaofeng, XU Xuegong, WANG Ruobai. Land subsidence and its influencing factors in Tianjin Coastal Area [J]. Journal of Pe

- king University, 2014, 50(6): 1071-1076. (in Chinese)
- [2] 胡琪坤. 天津市地下水功能分区及地下水位研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (HU Qikun. Study on function zoning and the control level of groundwater in Tianjin City[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [3] 王淼. 天津市中心城区地面沉降成因分析[D]. 天津: 天津大学, 2013. (WANG Miao. Analysis of land subsidence of factors in Tianjin city center downtown[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [4] 郑凡. 天津市地下水资源综合控制指标研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.(ZHENG Peng. Research on the indexes for integrated control of groundwater resources in Tianjin[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese))
- [5] 段永侯, 王家兵, 王粟斌, 等. 天津市地下水资源与可持续利用[J]. 水文地质工程地质, 2004(3): 29-39. (DUAN Yonghou, WANG Jiabin, WANG Libin, et al. Groundwater resources and its sustainable development in Tianjin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(3): 29-39. (in Chinese))
- [6] 董克刚, 王威, 于强, 等. 天津市地面沉降防治历史的调查研究及启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 54-59. (DONG Kegang, WANG Wei, YU Qiang, et al. History and enlightenment of land subsidence controlling in Tianjin City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 54-59. (in Chinese))
- [7] 胡海军, 宫爱玺. 天津市汉沽区深层地下水演变研究[J]. 地下水, 2014, 36(2): 22-24. (HU Aijun, GONG Aixi. Study on deep groundwater evolution in Hangu District of Tianjin[J]. Ground Water, 2014, 36(2): 22-24. (in Chinese))
- [8] 黄晓明, 丁尚起, 王润华. 浅析塘沽区地面沉降原因与控制[J]. 地下水, 2009, 31(1): 135-137. (HUANG Xiaoming, DING Shangqi, WANG Runhua. Cause and control of land subsidence in Tanggu District[J]. Ground Water, 2009, 31(1): 135-137. (in Chinese))
- [9] 潘云, 潘建刚, 宫辉力, 等. 天津市区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))
- [10] 刘江侠, 张建中, 刘波. 滨海地区地下水开采对地面沉降的影响分析[J]. 海河水利, 2013(1): 3-5. (LIU Jiangxia, ZHANG Jianzhong, LIU Bo. Analysis of effect of groundwater exploitation on land subsidence in coastal area[J]. Haihe Water Resources, 2013(1): 3-5. (in Chinese))
- [11] 许焯霜, 余恕国, 沈水龙. 地下水开采引起地面沉降预测方法的现状与未来[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(3): 352-357. (XU Yeshuang, YU Shuguo, SHEN Shuilong. State of the art of approaches of predicting land subsidence due to groundwater with drawal[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(3): 352-357. (in Chinese))
- [12] 天津市地面沉降防治规划(2011-2020年)[R]. 天津市控制地面沉降办公室, 2011. (Prevention and Control Planning of Ground Subsidence in Tianjin(2011-2020)[R]. Ground Subsidence Control Office of Tianjin, 2011. (in Chinese))
- [13] 天津市地下水压采实施方案[R]. 天津市地下水资源管理办公室, 2013. (Underground Water Mining Scheme of Tianjin[R]. Groundwater Resources Management Office of Tianjin, 2013. (in Chinese))
- [14] 王吉杰, 张媛媛. 渤海新区地下水开采现状、影响及对策[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(1): 78-80. (WANG Jijie, ZHANG Yuyuan. Groundwater exploitation status, influence and countermeasures of Bohai New District[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2012, 18(1): 78-80. (in Chinese))
- [15] 胡蓓蓓. 天津市滨海新区主要自然灾害风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2009. (HU Beibe. Major natural disaster risk assessment of Tianjin Binhai New Area[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009. (in Chinese))
- [16] 金江军, 潘懋. 我国地面沉降灾害现状与防灾减灾对策[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 118-120. (JIN Jiangjun, PAN Mao. Status of land subsidence damages and strategy for disaster prevention and mitigation in China[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1): 118-120. (in Chinese))
- [17] 李征, 周潮洪, 任必穷, 等. 天津市地面沉降及其对行洪河道的影响[J]. 海河水利, 2009(1): 23-25. (LI Zheng, ZHOU Chaohong, REN Biqiong, et al. The ground subsidence in Tianjin city and its influence on the river[J]. Haihe Water Resources, 2009(1): 23-25. (in Chinese))
- [18] 刘艳艳, 李志华, 刘耀峰, 等. 地面沉降对永定河中下游防洪安全影响分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 3(1): 42-45. (LIU Yanyan, LI Zhihua, LIU Yaofeng, et al. The impact of ground settlement on the flood control in middle and lower reaches of Yongding River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 3(1): 42-45. (in Chinese))
- [19] 吴清海. 地面沉降预测方法的探讨[J]. 测绘通报, 2009(2): 46-47. (WU Qinghai. Discussion of land subsidence prediction methods[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009(2): 46-47. (in Chinese))
- [20] 周潮洪, 刘波. 天津市地面沉降对水利工程的影响分析研究[J]. 工程地质学报, 2005(13): 135-139. (ZHOU Chaohong, LIU Bo. Study on the influence of land subsidence on water conservancy project in Tianjin[J]. Journal of Engineering Geology, 2005(13): 135-139. (in Chinese))