

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202041

李佳琦, 徐佳, 刘杰, 等. 天津地面沉降严重区分布特征及变化规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 53-60.

LI Jiaqi, XU Jia, LIU Jie, et al. Distribution characteristics and evolution trend of severe land subsidence areas in Tianjin City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 53-60.

## 天津地面沉降严重区分布特征及变化规律

李佳琦, 徐 佳, 刘 杰, 易长荣, 顾立军

(天津市地质事务中心, 天津 300040)

**摘要:**天津市地面沉降历史悠久, 自 1923 年至今共经历了 6 个不同的阶段。截至 2020 年, 天津市大面积的地面沉降已基本得到控制, 但局部还存在年沉降量大于 50 mm 的沉降严重区, 从大面积治理到小区域精准防控, 天津市地面沉降分布特征已体现出新形势, 地面沉降防治工作也面临着新的要求。为准确把握新形势下地面沉降发展规律, 精准施策, 针对性治理, 文中收集并分析 2010—2020 年天津市地面沉降水准测量、地下水位、地下水开采量等数据, 对 2010—2020 年天津市地面沉降严重区分布特征及演化规律进行归纳总结。研究结果表明: 2010—2020 年, 天津市地面沉降经历了沉降波动期(2010—2012 年)、稳中向好期(2013—2016 年)和快速减缓期(2017—2020 年)三个时期, 地面沉降平均沉降量下降了 37%, 沉降严重区面积减小了 67%。各阶段沉降变化均与地下水开采量密切相关, 截至 2020 年, 天津市现存集中分布于西南部的 5 个沉降严重区, 分布范围与深部含水组地下水漏斗分布范围基本一致。

**关键词:**地面沉降; 沉降严重区; 地下水开采; 防治措施

**中图分类号:** P642.26

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-8035(2023)02-0053-08

## Distribution characteristics and evolution trend of severe land subsidence areas in Tianjin City

LI Jiaqi, XU Jia, LIU Jie, YI Changrong, GU Lijun

(Tianjin Geological Affairs Center, Tianjin 300040, China)

**Abstract:** Tianjin has a long history of land subsidence, which has gone through six different stages since 1923. Although as of 2020, the land subsidence in a large area of Tianjin has been mostly controlled, there are still serious subsidence areas with an annual subsidence of over 50mm. From large-scale treatment to precise prevention and control of small areas, the distribution characteristics of ground subsidence in Tianjin have shown a new situation, and the prevention and control of land subsidence is also facing new requirements. To accurately grasp the development law of ground subsidence and implement precise policies under the new situation, this paper summarizes the distribution characteristics and evolution rules of severe land subsidence areas in Tianjin by collecting and analyzing the data of ground subsidence leveling, groundwater level, and groundwater extraction in Tianjin from 2010 to 2020. The results show that the land subsidence of Tianjin has experienced three periods during the ten years from 2010 to 2020: a fluctuation period in subsidence from 2010 to 2012, a steady improvement period from 2013 to 2016, and a rapid slowdown period from 2017 to 2020. During these periods, the average amount of land subsidence dropped by 37%, and the area of severe subsidence decreased by 67%. The changes in subsidence were closely related to the amount of groundwater extraction. As of 2020, five severe subsidence areas are concentrated in the southwest of

收稿日期: 2022-02-23; 修订日期: 2022-03-21

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

第一作者: 李佳琦(1989-), 女, 硕士研究生, 从事地面沉降监测与地下水研究工作。E-mail: 954810447@qq.com

通讯作者: 徐 佳(1980-), 男, 博士研究生, 从事地面沉降监测与地下水研究工作。E-mail: 34106124@qq.com

Tianjin, with a distribution range that is similar to the groundwater funnel of the deep water-bearing group.

**Keywords:** land subsidence; severe subsidence area; groundwater exploitation; prevention measures

## 0 引言

地面沉降是世界范围内普遍发生的缓变地质灾害<sup>[1]</sup>, 中国已有超过 50 个地区均发生过不同程度的地面沉降<sup>[2-4]</sup>, 其中京津冀平原是中国地面沉降影响面积最大的区域。天津作为京津冀地区的重要港口城市, 地面沉降灾害具有松散层巨厚、含水层结构极其复杂、地下水开发历史久、沉降监测序列长等特点, 是展现地面沉降灾害发生、发展、治理全过程的最具代表性的城市之一<sup>[5]</sup>。

天津市地下水开发利用历史悠久, 1898 年第一口供水井在中心城区建成, 到 1948 年天津市年平均抽水量达到  $4.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[6]</sup>, 1949 年以来天津市经历了快速的经济发展和城市化建设, 天津市地面沉降主要经历了 6 个阶段<sup>[7-8]</sup>:

① 沉降发生(1923—1957 年): 中心城区地下水开采量为  $2.00 \times 10^6 \sim 1.20 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ , 平均沉降速率  $7 \sim 12 \text{ mm/a}$ ;

② 分散式发展(1958—1966 年): 中心城区地下水开采量增加至  $1.20 \times 10^7 \sim 4.70 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ , 平均沉降速率  $30 \sim 50 \text{ mm/a}$ ;

③ 急剧发展(1967—1985 年): 中心城区地下水开采量达到  $1.00 \times 10^8 \sim 1.20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 平均沉降速率达到  $80 \sim 100 \text{ mm/a}$ , 沉降中心范围进一步扩大;

④ 初步治理(1986—1995 年): 天津市实施三期三年控沉计划, 集中治理地面沉降, 将中心城区的地下水开采量降至  $1.30 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$  左右, 平均沉降速率降至  $15 \text{ mm/a}$  左右;

⑤ 综合治理(1996—2010 年): 寻找替代水源, 沉降速率明显减缓, 中心城区地下水开采量降至  $1.30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , 平均沉降速率降至  $10 \sim 15 \text{ mm/a}$ ;

⑥ 沉降新形势(2010—): 通过采取一系列积极有效的综合防治措施, 天津市平均沉降量持续减小, 全市平原区年平均沉降量控制在  $18 \text{ mm}$  以内, 中心城区地面沉降速率降低到  $10 \text{ mm/a}$  以下。

经过几十年的努力, 天津市的控沉工作取得了一定的成果, 但作为滨海城市, 与上海等地年沉降速率控制在  $6 \text{ mm}$  以下相比, 天津市用水短缺问题仍然存在, 地下水超采问题依然突出, 地面沉降防控形势依然严峻。

天津市的地面沉降问题得到了学者们的广泛关注<sup>[9-10]</sup>, 针对天津市地面沉降监测、地面沉降成因、地

面沉降治理等方面也开展了诸多研究。张姣姣等<sup>[11]</sup>利用分层标监测数据和地下水位长期观测数据, 结合地层固结特征以及黏性土物理力学性质, 详细阐述了天津市西青区地面沉降特征; Cui 等<sup>[12]</sup>建立了天津平原地下水与地面沉降耦合数值模型, 研究 1998—2008 年的地下水资源及其变化, 并预测未来地下水位和相关地面沉降的变化模式; 郑玉萍等<sup>[13]</sup>研究了各类自然因素对天津市地面沉降的影响; 朱庆川等<sup>[14]</sup>利用层次分析法等多种数学方法对天津市地面沉降影响因素进行定量分析。针对天津市全市域的地面沉降演化研究, 多数仍集中于地面沉降综合治理阶段, 且并未重点关注地面沉降严重区(年沉降量大于  $50 \text{ mm}$  区域)的演化规律研究。目前, 天津市大范围的地面沉降已得到基本控制, 天津市地面沉降从大面积治理过渡到小区域精准防控, 为实现地面沉降“削峰”的目标, 有针对性地实施控沉措施, 地面沉降年沉降量不再是衡量沉降严重性和沉降治理成效的唯一指标, 地面沉降严重区面积也是一个十分重要的衡量标准。准确掌握新形势下地面沉降严重区分布特征及演化规律, 对于预测未来地面沉降发展趋势、采取主动、有效的沉降控制对策以及天津市安全、绿色、健康发展均具有重要意义。

## 1 研究区概况

天津市地处华北平原东北部, 东南临渤海, 北依燕山山脉, 西北部为我国首都北京市和河北省, 区内水运、铁路、航空、公路四通八达, 交通十分便捷。天津市属暖温带半湿润大陆季风气候, 四季分明, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 年平均气温  $11 \sim 12^\circ\text{C}$ 。全区多年平均降水量为  $582 \text{ mm/a}$ 。天津市基岩仅出露于北部低山丘陵及残丘地带, 其余大部分平原地区被第四系覆盖, 一般认为, 第四系厚度可达  $550 \text{ m}$ 。天津市地面沉降多发于南部平原区松散地层地下水超采区域, 北部山区主要开采基岩地下水, 地面沉降现象轻微<sup>[15]</sup>。

## 2 研究方法

天津市已形成一套完善的地面沉降监测网络体系, 平面上以水准监测网为主, GPS 和 InSAR 监测为辅, 垂向上以分层标组监测为主要手段, 并和均布全市的地下水位长期观测井结果相互验证。自 1985 年开始, 天津市开展大范围地面沉降水准监测工作, 监测频率为每

年一次,截至 2020 年,已积累了 35 年的地面沉降水准监测资料,监测面积由最初的 2 400 km<sup>2</sup> 扩展到现在的约  $1.1 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,覆盖天津市全部地面沉降区域<sup>[16]</sup>。每年地面沉降水准监测工作集中于秋季开展,历时约 2 月,通过将水准测量数据与全市范围内 23 个 GPS 连续监测站的同期观测数据联合处理获取地面沉降监测结果。本文通过收集整理 2010—2020 年地面沉降水准监测、地下水位动态监测、地下水开采量数据,利用数理统计和 ArcGIS 软件空间分析的方法分析新形势下天津市地面沉降严重区的分布特征及演化规律。为减少因极端气候变化对地面沉降防控评估工作的影响,当年地面沉降值采用近 3 年平均值(以 2019 年为例:2019 年现状值即为 2017—2019 年平均值)。

### 3 地面沉降严重区分布及演化特征分析

自 2010 年起,天津市地面沉降严重区面积以 2012 年为分界线,整体呈现先增大后减小的趋势,由 2012 年的 1 722 km<sup>2</sup> 减小至 2020 年的 576 km<sup>2</sup>。全市年平均沉降量(区域年平均沉降量:区域范围内每年发生的地面沉降总体积与区域面积的比值)变化趋势与地面沉降严重区面积基本相似,由 2012 年的 27 mm 降至 2020 年的 17 mm(图 1)。

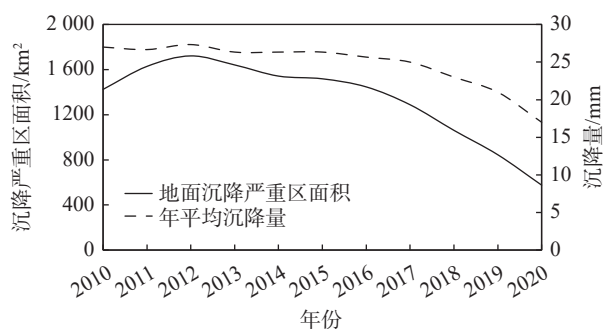


图 1 天津市年平均沉降量及沉降严重区面积变化趋势图

Fig. 1 Time-history curve of annual average subsidence and changes in severe subsidence zone area in Tianjin from 2010 to 2020

由图 2、图 3 可见,天津市地面沉降严重区集中分布于环城四区(东丽区、西青区、津南区、北辰区)、滨海新区、武清区和静海区等区域。2010—2012 年,各区地面沉降严重区面积均呈现增大趋势;2012—2014 年间,环城四区、滨海新区沉降严重区面积开始稳步减小,而武清区、静海区沉降严重区面积仍持续增大,因此,2010—2015 年,天津市全市平均沉降量基本持平,环城四区等老地面沉降严重区沉降形势有所减缓,但武清区南部、滨海新区东北部等新地面沉降严重区也在

逐步显现。2016 年起,天津市各区地面沉降严重区面积减幅明显,特别是环城四区和滨海新区,地面沉降严重区面积基本控制在 50 km<sup>2</sup> 以下,全市平均沉降量也持续减小,地面沉降治理成效显著。至 2020 年,天津市基本形成了如图 2(d)所示的 5 个沉降严重区,多数集中分布于天津市西南部。

### 4 地下水漏斗分布及演化特征分析

天津市地面沉降与地下水开发利用存在密切联系。如图 4、图 5 所示,天津市平原区深部含水组地下水位降落漏斗(水位埋深等值线大于 40 m 的区域)分布范围与地面沉降严重区基本位置一致,覆盖了 A-E 5 个沉降区。

结合图 6 可见,自 2010—2012 年起,天津市平原区深部第 II 含水组地下水位降落漏斗面积呈现波动变化,先增大后减小;2012 年以后地下水位降落漏斗面积整体呈现减小趋势,与地面沉降严重区面积和全市年平均沉降量变化趋势一致,而且沉降的峰值出现时间明显晚于水位的峰值出现时间,也体现了地面沉降对地下水开采的滞后效应。第 III 含水组地下水位降落漏斗面积呈现先减小后增大趋势,这主要是由武清—宝坻—宁河一带埋深等值线大于 40 m 区域面积增大引起的;第 III 含水组水位埋深等值线大于 60 m 的漏斗区域面积整体呈现先增大后减小趋势,2016 年出现拐点,与前述分析的 2016 年之后天津市地面沉降严重区面积和年平均沉降量减小相对应。

同时,2013—2019 年,第 II、III 含水组地下水位降落漏斗中心水位整体呈现减小趋势。2019 年,第 II 含水组已不存在埋深大于 80 m 区域,第 III 含水组已不存在埋深大于 90 m 区域。

### 5 地面沉降防治措施及建议

深层地下水的主要排泄方式是人工开采,其水位变化主要取决于人工开采量,针对地下水超采是影响天津市地面沉降的主要因素这一现状,天津市实行一系列的有效控沉措施,包括地下水开采控沉预审、地下水压采、水源转换等。由图 7 和图 8 可见,受地下水压采等多项措施的影响,自 2010 年起天津市深层地下水开采量呈现逐年递减的趋势,地下水位整体呈现波动式回升的趋势,与年平均沉降量减缓和地面沉降严重区面积减小的趋势相符,其中 2017 年以前,地下水位整体处于波动式回升,水位变化幅度较小,地面沉降减小趋势趋缓,2017 年以后,地下水位开始大幅度回升,地面沉降也开

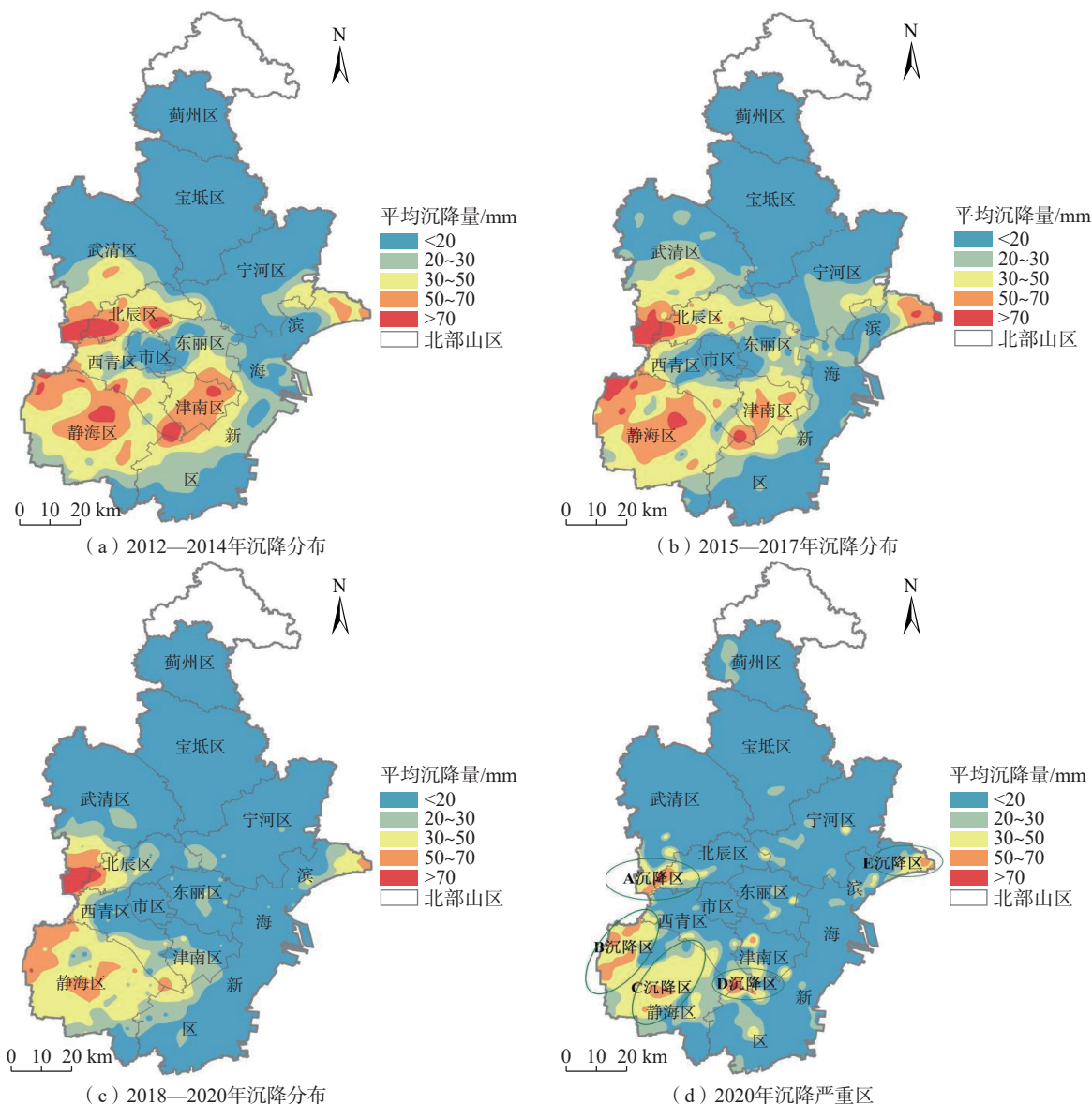


图 2 天津市平原区地面沉降情况对比图

Fig. 2 Comparison of land subsidence distribution in the plain area of Tianjin

始迅速下降。

自 2010 年起,在各项控制地面沉降措施和地下水压采取的措施影响下,天津市地面沉降开始呈现波动式发展;2014 年,天津市正式颁布实施了《天津市控制地面沉降管理办法》,同年《天津市地下水压采方案》获批,南水北调中线工程正式通水,既缓解了用水紧张的现状,又大力压采地下水,实行地面沉降速率、地下水位、地下水开采量三元控制,天津市地面沉降形势稳中向好;2016 年,天津市实施控制地面沉降分区管理,并逐步将控沉指标纳入到市政府对区政府的绩效考核评价体系,地下水压采和控沉力度逐步加大,2017 年开始,天津市地面沉降开始快速减缓,控制地面沉降工作

取得了显著成效。2010—2020 年,地面沉降严重区面积大幅减小,减小了 67%,年平均沉降量下降了 37%(沉降严重面积及年平均沉降量变化均由以下公式计算获得)。

$$C = \frac{B-A}{A} \times 100$$

式中:  $C$ ——地面沉降严重区面积(年平均沉降量)变化百分比/%;

$B$ ——2020 年地面沉降严重区面积(年平均沉降量)/ $\text{km}^2(\text{mm})$ ;

$A$ ——2010 年地面沉降严重区面积(年平均沉降量)/ $\text{km}^2(\text{mm})$ 。

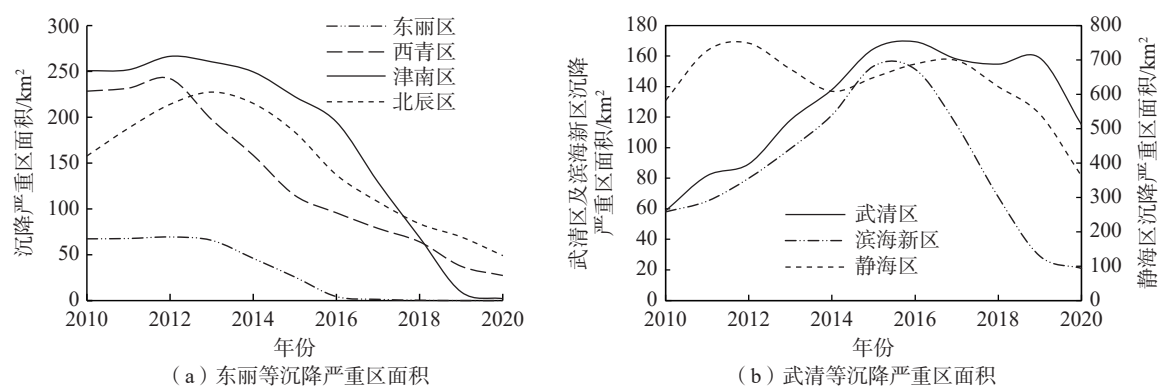


图 3 天津市各区地面沉降严重区面积变化趋势图

Fig. 3 Time-history curve of areas with severe land subsidence in Tianjin from 2010 to 2020

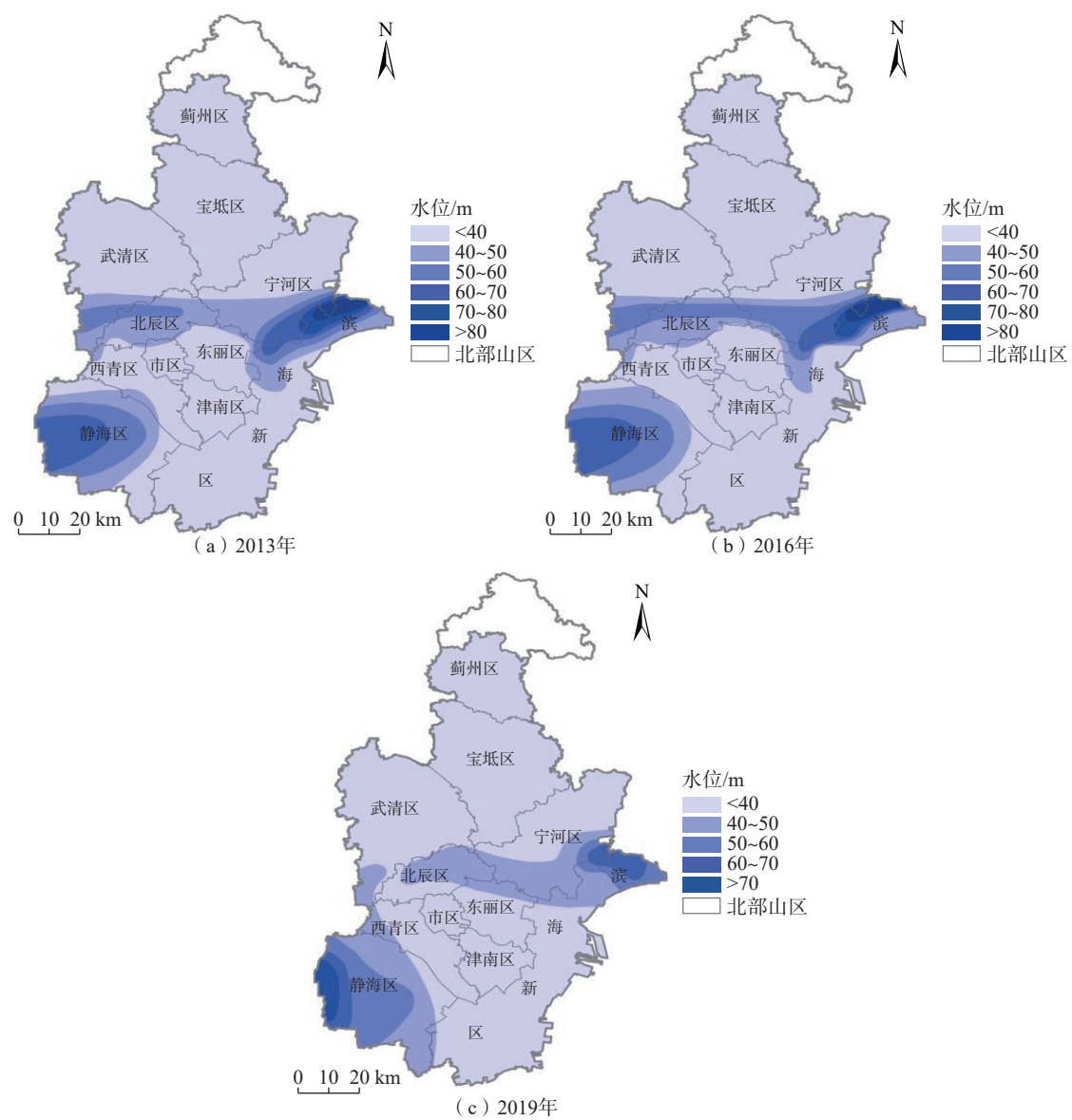


图 4 天津市第Ⅱ含水组水位等值线图

Fig. 4 Groundwater level contour map of the second water-bearing group in Tianjin

注: 据 2013、2016、2019 年《天津市水资源公报》。

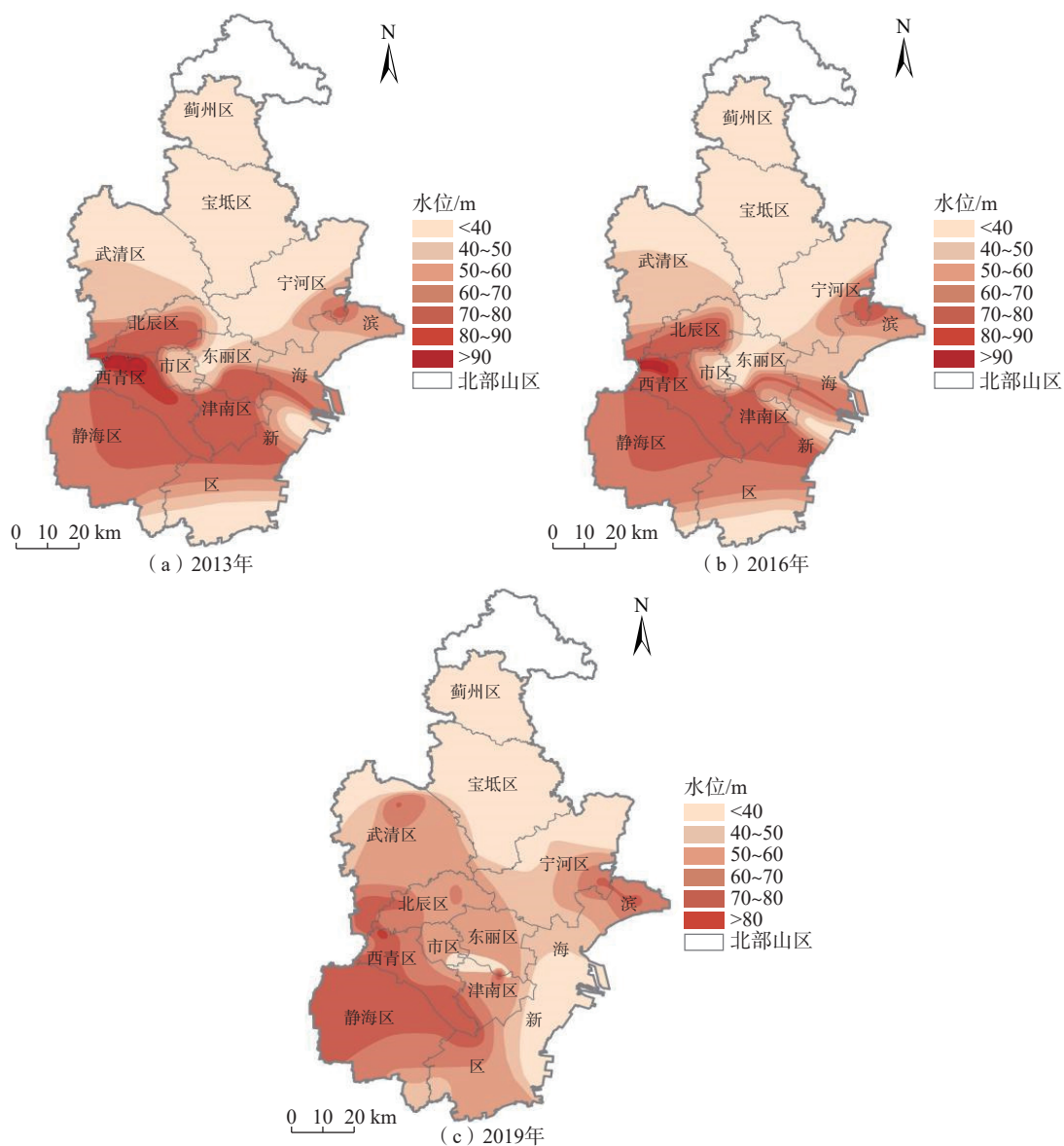


图 5 天津市第Ⅲ含水组水位等值线图

Fig. 5 Groundwater level contour map of the third water-bearing group in Tianjin

注: 据 2013、2016、2019 年《天津市水资源公报》。

总结地面沉降防治措施的历史经验, 结合地面沉降现状, 针对天津市地面沉降的特点, 对地面沉降防治措施提出建议: ①完善地面沉降监测体系, 实现地面沉降多频次、多手段融合监测; ②加强地下水资源管理与保护, 加大以地面沉降防治为导向的地下水超采治理力度, 开展向地面沉降严重区调配地表水的输水工程, 切实减少地面沉降严重区地下水开采量, 大力推进农业节水, 寻找替代水源; ③开展地下水人工回灌的相关技术研究, 为在地面沉降严重区开展回灌工程做技术储备, 并积累运行管理经验; ④建立京津冀地面沉降联防联控机制, 实现信息共享, 同步治理<sup>[17-20]</sup>。

## 6 结论

本文通过长序列的地面沉降监测数据整理及分析, 对天津市新形势下地面沉降严重区分布特征及演化规律进行归纳总结, 主要得到以下结论:

(1) 自 2010 年起, 天津市地面沉降可划分为 3 个阶段: ①2010—2012 年: 沉降波动期; ②2013—2016 年: 稳中向好期; ③2017—2020 年: 快速减缓期, 且各阶段沉降变化规律与地下水开采量变化关系密切。

(2) 至 2020 年, 天津市基本形成了集中分布于西南部的 5 个沉降严重区, 且与深部含水组地下水漏斗分布

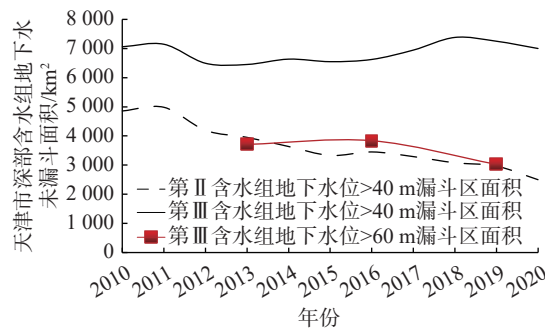


图 6 天津市深部含水组地下水水位漏斗面积变化趋势图  
(2010—2020 年)

Fig. 6 Time-history curve of groundwater level drop funnel area in deep water-bearing group of Tianjin from 2010 to 2020

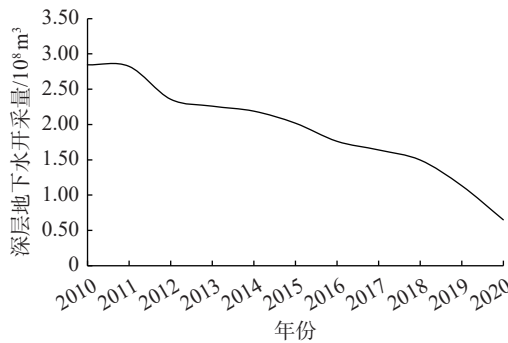


图 7 天津市深层地下水开采量变化趋势图(2010—2020 年)

Fig. 7 Time-history curve of deep groundwater exploitation quantity in Tianjin from 2010 to 2020

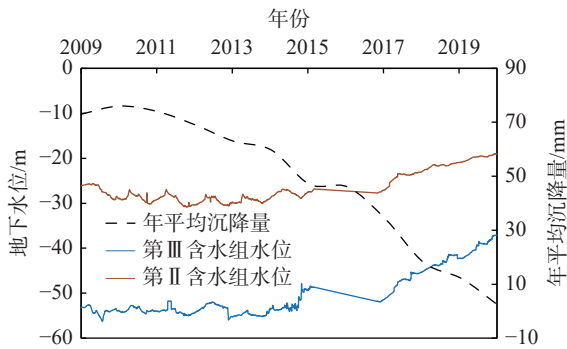


图 8 沉降严重区内某观测井水位及沉降动态曲线图

Fig. 8 Changes of ground water level and land subsidence of an observation well in severe land subsidence area in Tianjin

范围基本一致,10 a 间地面沉降严重区面积整体呈下降趋势,减小了 67%。

近年来,虽然天津市地面沉降年平均沉降量和严重区面积均完成了相关规划指标,天津市控制地面沉降工作取得了显著成效,但部分水资源严重匮乏地区的产业结构、产业布局与区域水资源条件不适应,压采难度大,周边省市地下水超采对天津市地面沉降影响明显等问题仍然存在,地面沉降问题仍然不容忽视。

参考文献(References):

[1] 张阿根,魏子新.中国地面沉降[M].上海:上海科学技术出版社,2005. [ZHANG Agen, WEI Zixin. Chinese land subsidence [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2005. (in Chinese)]

[2] 易长荣.天津市控制地面沉降工作最新进展[J].海河水利,2017(增刊1):42-43. [YI Changrong. The latest progress of land subsidence control in Tianjin [J]. Haihe Water Resources, 2017(Sup 1): 42-43. (in Chinese)]

[3] 董英,张茂省,刘洁,等.西安市地下水与地面沉降地裂缝耦合关系及风险防控技术[J].西北地质,2019,52(2):95-102. [DONG Ying, ZHANG Maosheng, LIU Jie, et al. Coupling relationship between groundwater and ground fissures of land subsidence in Xi'an City and risk prevention and control technology [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 95-102. (in Chinese with English abstract)]

[4] 袁铭,白俊武,秦永宽.国内外地面沉降研究综述[J].苏州科技学院学报(自然科学版),2016,33(1):1-5. [YUAN Ming, BAI Junwu, QIN Yongkuan. A review on land subsidence research [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 33(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)]

[5] 董克刚,王威,于强,等.天津地面沉降区土水比论述[J].水文地质工程地质,2008,35(5):76-80. [DONG Kegang, WANG Wei, YU Qiang, et al. Ratio of soil loss to groundwater-exploitation in the Tianjin land subsidence area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(5): 76-80. (in Chinese with English abstract)]

[6] 天津市地方志编修委员会.天津通志-水利志[M].天津:天津社会科学院出版社,2004. [Tianjin Local Chronicle Editing Committee. Overall annals of Tianjin [M]. Tianjin: Tianjin Academy of Social Sciences Press, 2004. (in Chinese)]

[7] 孙海涛.天津地区地面沉降相邻漏斗的影响研究[D].天津:天津大学,2018. [SUN Haitao. Study on the influence of adjacent funnels on ground settlement in Tianjin area [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese with English abstract)]

[8] 郭海朋,白晋斌,张有全,等.华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J].中国地质,2017,44(6):1115-1127. [GUO Haipeng, BAI Jinbin, ZHANG Youquan, et al. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the north China Plain [J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1115-1127. (in Chinese with English abstract)]

[9] 白晋斌,牛修俊.天津新生界固结特征与地面沉降[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):42-46. [BAI Jinbin, NIU Xiujun. Cenozoic consolidation characteristics and land subsidence in Tianjin [J]. The Chinese Journal of Geological

- Hazard and Control, 2010, 21(1): 42–46. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 吕潇文, 宋利, 邵兴, 等. 天津市地面沉降监测技术应用及发展建议 [ J ]. 上海国土资源, 2017, 38(2): 26–30. [ LYU Xiaowen, SONG Li, SHAO Xing, et al. The suggestion and application of land subsidence monitoring in Tianjin [ J ]. Shanghai Land & Resources, 2017, 38(2): 26–30. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 张姣姣, 牛文明, 吕潇文, 等. 天津地下水长期开发地区地面沉降特征 [ J ]. 上海国土资源, 2019, 40(1): 77–80. [ ZHANG Jiaojiao, NIU Wenming, LYU Xiaowen, et al. Characteristics of land subsidence in an area of long-term groundwater mining in Tianjin [ J ]. Shanghai Land & Resources, 2019, 40(1): 77–80. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] CUI Yali, SU Chen, SHAO Jingli, et al. Development and application of a regional land subsidence model for the plain of Tianjin [ J ]. Journal of Earth Science, 2014, 25(3): 550–562.
- [ 13 ] 郑玉萍, 韩晔, 王巍, 等. 自然因素对天津市地面沉降影响分析 [ J ]. 中国煤炭地质, 2014, 26(4): 36–40. [ ZHENG Yuping, HAN Ye, WANG Wei, et al. Analysis of impacts on surface subsidence from natural factors in Tianjin municipality [ J ]. Coal Geology of China, 2014, 26(4): 36–40. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 朱庆川, 徐冬. 汉沽区地面沉降及控制措施 [ A ]. 全国控制地面沉降学术研讨会论文集, 2005(13): 82–85. [ ZHU Qingchuan, XU Dong. Land subsidence and control measures in Hangu District [ A ]. Journal of Engineering Geology, 2005(13): 82–85. (in Chinese) ]
- [ 15 ] 雷坤超, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于PS-InSAR技术的天津地面沉降研究 [ J ]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 106–111. [ LEI Kunchao, CHEN Beibei, GONG Huili, et al. Detection of land subsidence in Tianjin based on PS-InSAR technology [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 106–111. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 2020年度天津市地面沉降年报 [ R ]. 天津: 天津市规划和自然资源局, 2021. [ 2020 Tianjin land subsidence annual report [ R ]. Tianjin: Tianjin Municipal Bureau of Planning and Natural Resources, 2021. (in Chinese) ]
- [ 17 ] 葛伟丽, 李元杰, 张春明, 等. 基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析 [ J ]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 198–206. [ GE Weili, LI Yuanjie, ZHANG Chunming, et al. An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 198–206. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 张凯翔, 张占荣, 于宪煜. SBAS-InSAR和PS-InSAR技术在鲁西南某线性工程沿线地面沉降成因分析中的应用 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 65–76. [ ZHANG Kaixiang, ZHANG Zhanrong, YU Xianyu. Application of SBAS-InSAR and PS-InSAR technologies in analysis of landslide subsidence along a linear infrastructure in southwestern Shandong [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 65–76. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 孟世豪, 崔亚莉, 田芳, 等. 基于MODFLOW-SUB建立变渗透系数的地下水流-地面沉降模型 [ J ]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 52(2): 550–559. [ MENG Shihao, CUI Yali, TIAN Fang, et al. Modeling of groundwater flow-land subsidence with variable hydraulic conductivity based on MODFLOW-SUB [ J ]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 52(2): 550–559. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 程蕊, 朱琳, 周佳慧, 等. 北京潮白河冲洪积扇地面沉降时空异质性特征及驱动因素分析 [ J ]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1182–1192. [ CHENG Rui, ZHU Lin, ZHOU Jiahui, et al. Spatio-temporal heterogeneity and driving factors of land subsidence in middle-lower part of Chaobai River alluvial fan [ J ]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1182–1192. (in Chinese with English abstract) ]