

doi: 10.6046/zrzyyg.2022153

引用格式: 于海若, 宫辉力, 陈蓓蓓, 等. 天津市南部平原地面沉降区新兴风险评估[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 182–192.  
(Yu H R, Gong H L, Chen B B, et al. Emerging risk assessment of areas subject to land subsidence in the southern plain of Tianjin, China[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2): 182–192.)

# 天津市南部平原地面沉降区新兴风险评估

于海若<sup>1,2,3</sup>, 宫辉力<sup>4,5,6,7,8,9</sup>, 陈蓓蓓<sup>4,5,6,7,8,9</sup>, 周超凡<sup>4,5,6,7,8,9</sup>

(1. 山东工商学院公共管理学院, 烟台 264005; 2. 自然资源部测绘科学与地球空间信息技术重点实验室, 北京 100039; 3. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054; 4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 5. 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048; 6. 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048; 7. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 8. 首都师范大学地面沉降机理与防控教育部重点实验室, 北京 100048; 9. 首都师范大学水资源安全北京实验室, 北京 100048)

**摘要:** 新兴技术的发展在优化城市建设和改善人类生活的同时, 也存在着一定的风险, 进而引发城市安全问题。天津市是中国的沿海城市, 其沿海海平面的不断上升, 南水北调改变水循环, 地下空间的开发利用, 这些因素与地面沉降进行叠加耦合都将成为天津市新兴风险评价的重要因素。文章首先对天津市南部平原沉降信息进行获取, 叠加海平面上升速率预测天津市自然海岸线后退情况。基于此, 利用机器学习方法(XGBoost)预测天津市相对海平面上升带来的高风险因素。此外, 针对南水北调-地下空间开发的应用带来的新兴风险进行分析, 揭示南水北调和地铁建设运行对天津市城市安全的响应规律。这些地面沉降与现代人类活动结合带来的新兴风险分析研究将为区域防灾减灾提供科学依据, 提高城市抵御灾害的能力。

**关键词:** 地面沉降; 新兴风险; 相对海平面上升; XGBoost

**中图分类号:** TP 79; P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)02-0182-11

## 0 引言

随着全球化进程的不断推进, 科学技术不断发展, 风险也不断演变并逐渐超出传统风险的界限。新兴技术的发展带来的风险被称为新兴风险。新兴风险的产生不仅是环境自身变化的结果, 而且与人类社会的经济发展和制度环境有着直接关系, 正是剧烈的人类活动才提高了风险的复杂性、不可预测性和不确定性<sup>[1]</sup>。天津市因漕运而兴起, 现今是我国北方航运、经济、文化的核心区。天津市地下空间开发利用在保障城市高速发展、缓解城市交通压力中起到了重要作用, 同时它的开发也改变了原有的地质结构, 引发或者加剧了地面沉降现象的发生, 地面沉降是一种累进性的缓变地质现象, 严重威胁城

市安全, 反过来又制约着城市地下空间的开发利用。天津作为沿海城市, 海岸带的特殊地理优势使得国家很多重大项目在此建设, 沿海地区的海平面上升本就是威胁城市安全的重要因素, 如果与地面沉降叠加, 风险性将大幅提高。地下水的变化是地面沉降的最主要影响因素, 近年来南水北调背景下城市水循环规律也在慢慢改变, 区域水循环系统的变化将直接改变区域地面沉降的动态平衡。这些新兴的人类活动在优化城市建设的同时, 也存在着一定的风险。综上, 天津市因地面沉降而引发的新兴风险分别是地面沉降叠加海平面上升而形成的相对海平面上升风险和南水北调-地下空间开发的新兴风险。南水北调-地下空间开发的新兴风险可具体为因南水北调工程而引起的天津市响应风险和因地铁建设引起的地面沉降的响应风险。对城市新兴风险

**收稿日期:** 2022-04-18; **修订日期:** 2023-01-01

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目“京津冀典型区地下空间演化与地面沉降响应机理研究”(编号: 41930109)、国家自然科学基金面上项目“南水北调背景下地面沉降演化机理”(编号: 41771455)、地理信息工程国家重点实验室和自然资源部测绘科学与地球空间信息技术重点实验室开放课题项目“天津沿海地区地面沉降与海平面上升叠加效应及其风险分析”(编号: 2021-02-09)共同资助。

**第一作者:** 于海若(1991-), 女, 讲师, 主要从事地面沉降机理和应用研究。Email: yhr\_cnu@163.com。

**通信作者:** 宫辉力(1956-), 男, 博士生导师, 主要从事地理信息系统和遥感的教学与应用研究。Email: gonghl\_1956@126.com。

进行评估可在南水北调背景下重新发现地面沉降响应规律,优化面向地下空间安全的新兴风险预警机制,建立陆海统筹的监测系统,实现对区域的科学调控。

根据已有的研究成果预测,1900—2100年,天津市相对海平面将上升231 cm。如果海平面上升30 cm而不加防护和治理,天津市的自然海岸线将后退50 km,到达天津市区,淹没土地约10 000 km<sup>2</sup>。如果海平面上升100 cm,海岸线将后退70 km,而海水可能影响到的总面积约16 000 km<sup>2</sup>。随着时间的推移,沿海地区地面沉降范围逐年扩大、沉降量逐年增加,且空间分布不均匀程度逐渐加剧<sup>[2]</sup>。天津市沿海地区沉降虽然较天津市城区发育程度较低,但在微量沉降和城区安全防护要求极高的前提下,海平面的上升,叠加地面沉降,使得天津沿海地区城市安全问题非常突出。天津地铁作为天津城市交通建设的重大工程项目,也是天津市地下空间开发的重大工程,这些运营的或在建设中的地铁线路穿过多个天津市地面沉降活跃区,这给地铁的建设施工及建成后的安全管理、平稳运营带来严重的安全隐患。然而,关于天津市地铁建设和运行与地面沉降之间相互影响的研究尚不完善,仅在2020年吕传振等<sup>[3]</sup>对地铁沿线区域进行水准测量获得地铁沿线的地面沉降特征,并对地铁建设对地面沉降的影响做出分析,这对天津市地铁规划建设和地面沉降影响因素分析具有重要意义。关于天津市南水北调的研究多是直接研究南水进津对地下水变化的影响,而对于南水进津背景下,地面沉降具体的响应模式没有过多讨论。因此本文的重点将围绕相对海平面上升来进行研究,对南水北调—地下空间开发的新兴风险研究将从历史资料和现有数据的角度进行分析。

对于沿海相对海平面上升(地面沉降叠加海平面上升)全球很多沿海地区都有所研究<sup>[4-10]</sup>,研究最深入的是雅加达地区。雅加达由于地面沉降和海平面上升双重影响正在以最快的速度逐渐下沉,根据监测数据该地30 a后可能消失。而相对海平面上升带来的城市安全风险的研究方法和模型研究目前也仅有雅加达对其进行了保守情景和悲观情景的海水淹没模拟。这是已经存在的较为完整的相对海平面风险模型<sup>[11-13]</sup>。然而,目前天津还未对相关模型展开研究。仅有以海平面变化、地面高程状况、潮汐特征结合经济指标来描述天津市因海平面上升成为高脆弱高风险地区的研究<sup>[14]</sup>。其他还对于地面沉降和海平面上升方面做了现状分析和预测工作<sup>[15]</sup>。因此需要研究新技术、新方法的集成与优化,进行地面沉降新兴风险评价。本文尝试引入极

限梯度提升算法(extreme gradient boosting, XGBoost)进行天津市城市安全风险评价,XGBoost模型是最为强大的机器学习算法之一,采用错误率取样,从一个弱学习器逐步增强,获得好的学习结果,泛化能力更强也更专注于模型的可解释性。根据最新研究成果,XGBoost模型逐步应用到地质灾害领域中,例如滑坡<sup>[16]</sup>、地面沉降<sup>[17]</sup>和公路崩塌<sup>[18]</sup>的风险预测中。

天津市地面沉降主要位于南部平原区,因此本文以天津市南部平原为研究对象,通过小基线集成孔径雷达干涉测量(small baseline subset interferometry synthetic aperture Radar, SBAS-InSAR)技术,获取天津市地面沉降监测信息。将渤海海平面高度数据与地面沉降年沉降量融合,获取相对海平面年际变化量,预测天津市自然海岸线后退情况。结合已有的海平面上升的观测数据、沿海平原地面沉降监测数据、分层地下水数据以及土地分类现状等资料,引入XGBoost机器学习法,从地球科学角度分析海平面上升与地面沉降叠加作用与城市安全问题,建立陆海统筹的XGBoost城市安全评估模型,分析主要贡献因素。此外,随着南水北调—地下空间开发影响不断加深,针对这些技术的应用带来的新兴风险也做简要探索,以期从多角度分析地面沉降与新的人类活动结合带来的新兴风险,为区域防灾减灾提供科学依据。

## 1 研究区及其数据源

天津市位于中国华北平原,平原区面积约10 664 km<sup>2</sup>。因天津市沉降主要集中于南部平原,因此研究区以E119°21', N39°13'为中心点,基本覆盖天津南部平原区,地理位置如图1所示。天津市流域分区分为北三河山区、北四河下游平原、大清河淀东平原等。天津市北部为全淡水区第四系含水层组地下水,南部为有咸水体上部的第四系含水层组地下水。根据研究需要,使用Sentinel-1数据来获取天津市地面沉降信息,选取2012年1月—2016年10月Radarsat-2(20120128—20161021)2个条带的88景数据以及2016年1月—2018年12月Sentinel-1 Track 69, Frame 143的72景升轨影像开展天津市平原区地面沉降的时空演化研究,数据图幅覆盖范围见图1。使用2012—2018年天津市水资源公报统计数据水资源公报数据获得分层地下水水位变化情况。对2012—2018年第一含水层、第二承压含水层、第三承压含水层等值线进行矢量化,并提取2012—2018年累计水位变化等值线,将其和同

时期累计地面沉降量以及海平面数据叠加,分析天津市城市安全的影响因素。海平面高度来源于法国国家空间中心 AVISO+ 数据中心提供的融合多颗卫星高度计的海平面高度年平均产品,计算出的数据结果与中国海平面公报中给出海平面年际变化量进行对比和校正。AVISO+ 获取渤海海平面高度数据 (sea surface height products) 为 3.2 mm/a,《2018 年中国海平面公报》显示,近 40 a 来,中国渤海海平面平均上升速率为 3.3 mm/a,因此 AVISO+ 数据平台获得的海平面变化数据真实可信。

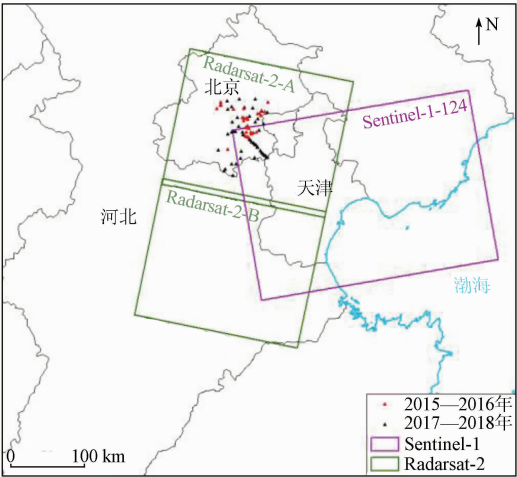


图 1 天津市地理位置与影像覆盖范围示意图  
Fig.1 Location of Tianjin and the coverage of images

2 研究方法与技术路线

2.1 研究方法

2.1.1 SBAS-InSAR

研究使用 SBAS-InSAR 对 Radarsat-2 和 Sentinel-1 数据进行处理,获取地表形变信息。SBAS 技术其基本思想是在数据量较少的情况下,以像对基线短为原则,选择多个主影像组成多个短基线子集进行组合,尽可能多得获取观测值的个数,可以解决依靠单个子集时间提取形变序列问题,以此来求解形变速率。本文选取拍摄于 2014 年 4 月 23 日和 2017 年 6 月 25 日作为主影像。确定主影像后,将其他辅影像配准到主影像上,使所有合成孔径雷达 (synthetic aperture Radar, SAR) 图像都使用相同的坐标进行配准。图像配准包括 2 个步骤:基于图像参数文件的粗配准和基于最小二乘法的精确配准方法。

通过设置时间基线、空间基线阈值构建干涉相对,生成多个小基线集,集合内基线距较小,集合间基线距较大。小基线集的自由组合可以获得更多高相干性的干涉像对,提高监测的时间采样率,同时可

以选取更多的高相干点,从而减弱时空失相关和大气相位的影响,提高相位解缠精度。选取了空间和时间基线分别小于 300 m 和 300 d 的干涉图像对。利用空间分辨率为 90 m 的 SRTM 数据去除地形相位。经过差分干涉处理后每个像元包含的组分为:

$$\varphi_{\text{dint}} = \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{orbit}} + \varphi_{\text{noise}}, \quad (1)$$
$$\varphi_{\text{def}} = \varphi_{\text{def\_lin}} + \varphi_{\text{def\_non}}, \quad (2)$$

式中:  $\varphi_{\text{dint}}$  为差分干涉相位;  $\varphi_{\text{def}}$  为形变相位,包括线性形变  $\varphi_{\text{def\_lin}}$  和非线性形变相位  $\varphi_{\text{def\_non}}$ ;  $\varphi_{\text{topo}}$  为地形相位;  $\varphi_{\text{atm}}$  为大气相位;  $\varphi_{\text{orbit}}$  为轨道相位;  $\varphi_{\text{noise}}$  为噪声相位。在后续数据处理过程中,去除这些误差组分,是准确获取地表形变值的关键。

2.1.2 XGBoost

XGBoost 本质上是一个梯度提升决策树 (gradient boosting decision tree, GBDT)<sup>[19]</sup>。它以一种迭代的方式建立模型,在不针对某个明确的学习任务的情况下先学习出一个模型,将前一次训练中的无法正确分类的样本提取出来,作为下次训练中重点关注的对象,继续学习第二个模型。以此类推,直到模型可以正确分类所有样本。针对具体的研究需要使用 python 语言编程建立 XGBoost 机器学习模型,具体步骤如下: ①首先使用 Z-score 对原始数据进行标准化处理,目的是使得数据更规范,便于训练的收敛; ②随机划分数据集,其中 70% 作为训练集,30% 作为测试集; ③使用 XGBoost 集成算法对数据进行训练,调节 XGBoost 模型中的学习率 *learning\_rate*、迭代步数 *n\_estimators*、回归树最大深度 *max\_depth*、最小样本权重 *min\_child\_weight* 等参数; ④采用随机切分的方法对测试机的数据进行测试,对比预测值的曲线和实际的曲线,计算测试集的平均相对误差来评估模型的精度,使训练模型在测试集的预测结果上达到较高的准确率; ⑤根据模型生成过程中的信息,按 F-score 排序,得到特征的重要性。

2.2 技术路线

研究技术流程为首先利用 SBAS-InSAR 方法处理多景 Radarsat-2 和 Sentinel-1 数据获取天津市 2012—2018 年地面沉降监测信息并对天津市沿海地区地面沉降总体特征进行分析; 为了将地面沉降数据与地下水数据、土地分类数据、海平面上升数据统一到共同数据尺度,将研究区域划分为 1 km × 1 km 的栅格,以简化数据并保证主要成分不丢失<sup>[20]</sup>。在机理研究的基础上,继续对天津市沿海地区地面沉降对海平面变化的响应进行研究。将海平面高度变化数据与地面沉降年沉降量叠加,获取相对海平面年际变化量,预测未来天津市自然海岸线后退区域。

结合光学遥感数据,使用最大似然分类法对天津市南部平原土地利用现状进行分类;采用 XGBoost 机器学习的方法,综合地面沉降、地下水和数字高程模型(digital elevation model,DEM)等多种因素建立指标体系对相对海平面上升所引发的新兴风

险评估。将天津市建设的地铁线和南水北调的水站点叠加到地面沉降背景下,分析南水北调-地下空间开发与地面沉降的相互影响作用,以期从多角度分析地面沉降与新的人类活动结合带来的新兴风险,提高抵御灾害的能力。具体技术流程如图 2 所示。

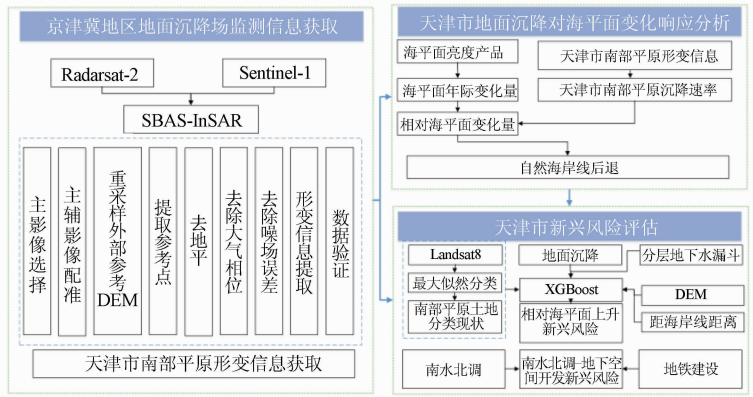


图 2 技术流程  
Fig. 2 Technical flow chart

3 结果与分析

3.1 天津市南部平原地面沉降监测结果

2012—2016 年间,研究区地面累计沉降量最大值为 540 mm,年均最大沉降速率为 135 mm/a。从图 3(a)中可以大致看出天津市存在 2 个沉降区,分别是以王庆坨为中心的武清沉降区和以大丰堆为中心的静海沉降区。天津市年均沉降速率在 2016—2018 年间,Sentinel-1 数据所覆盖地区内最大沉降

中心沉降速率仍高于 100 mm/a。天津市最大沉降中心仍位于武清区王庆坨镇,最大沉降速率与上一时段相比减小,为 102.07 mm/a,累计沉降量最大为 306.21 mm(图 3(b))。取地面沉降速率大于 80 mm/a,60 mm/a 和 40 mm/a 的区域作为沉降中心区。具体包括王庆坨沉降中心、台头沉降中心、独流沉降中心、王稳庄沉降中心、双塘沉降中心和中塘沉降中心。2012 年 1 月—2018 年 12 月间,天津市平原区发生了明显的地面沉降,地面沉降分布具有显著的空间差异性特征,空间不均匀程度进一步加

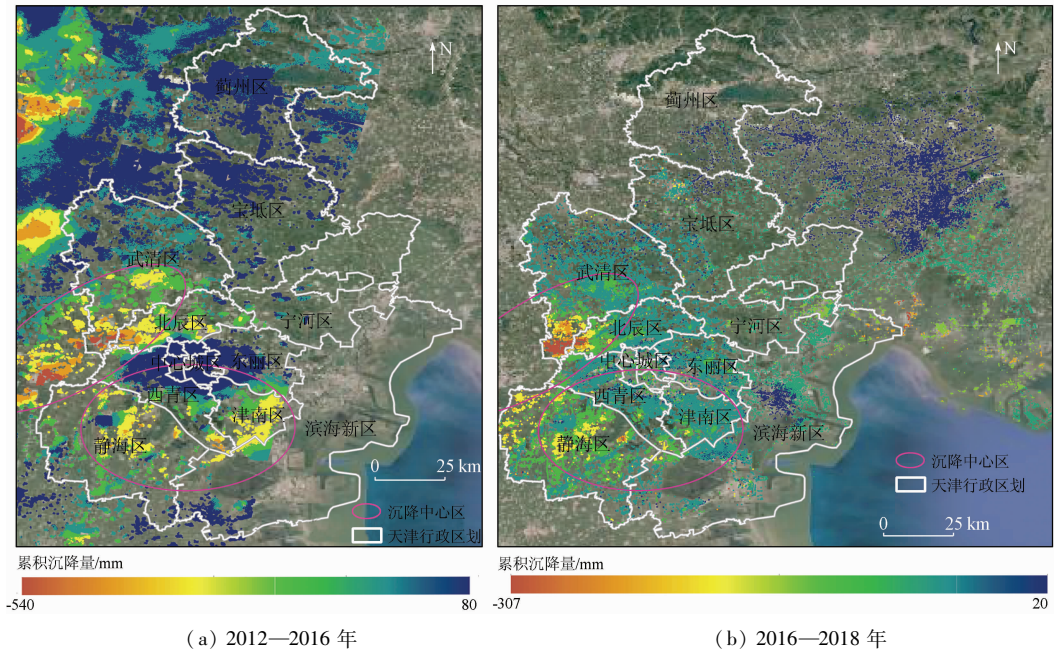


图 3 2012—2018 年天津累计沉降量  
Fig. 3 Distribution of accumulated settlement in Tianjin from 2012 to 2018

剧,并在局部形成地面沉降中心。沉降区范围东部发展到王稳庄和中塘地区。沉降范围及沉降中心有向东部沿海外扩趋势应当引起相关部门和研究人员的重视。

3.2 结果验证

沉降结果验证采用水准验证和交叉验证 2 种方式: ①使用 2015—2016 年的水准监测数据对 Radarsat-2-A 沉降结果进行精度验证,在沉降研究区 30 个水准点中挑选了 21 个水准点与相应的点进行对比,结果如图 4 所示。 $R^2$  为 0.901 2。同理,从 2017—2018 年的 50 个水准点中选出 39 个水准点对 Sentinel-1 沉降结果进行精度验证。 $R^2$  达到 0.925 3。2 个时序的 InSAR 测量提取的累计沉降量与水准测量累计沉降量对比,可以发现两者走势基本一致,验证结果表明 SBAS-InSAR 监测结果与水准测量值具有较好的一致性。②由于 Radarsat-2-A

A 和 Radarsat-2-B 产品之间存在空间上的部分重叠,选取重叠区域中的 5 565 个点进行累计沉降量的对比,结果如图 5 所示。图 5 说明了这 2 个累计沉降量之间的正相关关系, $R^2$  为 0.883 2,证明了 2 次测量的可靠性。

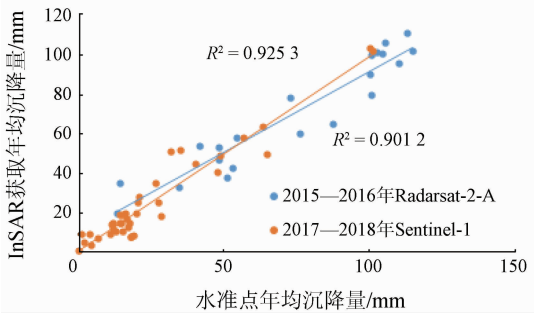


图 4 水准监测点与 InSAR 数据年均沉降量对比  
Fig. 4 Comparison of the leveling deformation and the annual deformation of InSAR

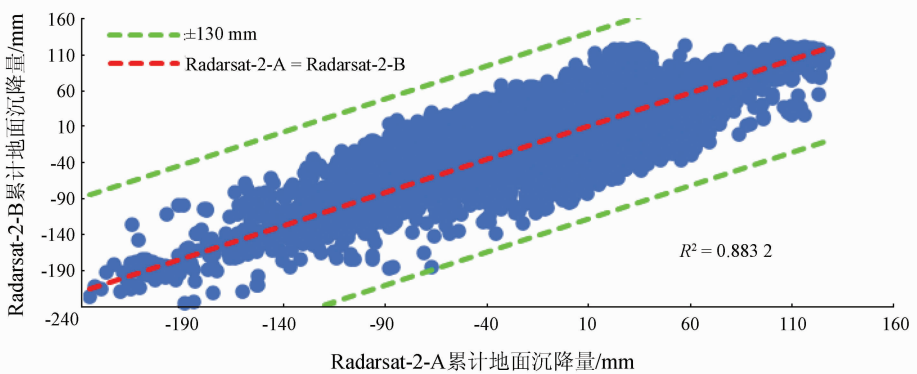


图 5 Radarsat-2-A 和 Radarsat-2-B 数据年均沉降量对比  
Fig. 5 Comparison of the annual deformation derived from Radarsat-2-A and Radarsat-2-B

3.3 结果优化

除以上 2 种验证外,基于研究问题的需要,根据 Sentinel-1 数据 2016—2018 年研究结果,天津市滨海新区平均地面沉降量为 16 mm,较 2016 年减少 5 mm。其中,塘沽平均沉降量为 14 mm,最大沉降量为 58 mm;汉沽平均沉降量为 27 mm,最大沉降量为 58 mm;大港平均沉降量为 16 mm,最大沉降量为 51 mm。此外,天津市沿海地区由于地质构造和自然压密产生的自然沉降量为 3 mm/a<sup>[21-22]</sup>。根据以上数据,结合多年海平面上升数据,天津地区的相对海平面平均上升速率定为 19.2 mm/a。天津市沿海地区沉降虽然较天津市城区发育程度较低,在微量沉降和城区安全设防要求极高的前提下,海平面的上升,叠加地面沉降,使得天津沿海地区城市安全问题非常突出。

4 天津市地面沉降相关新兴风险

传统风险不断演变,新兴技术的发展带来了社

会的巨大进步,然而伴随着技术变革而来的是高强度的资源开发,由此带来的区别于传统意义上的风险被称之为新兴风险。天津市地面沉降与新兴技术结合的风险评价主要从相对海平面上升新兴风险和南水北调-地下空间开发的新兴风险 2 个方面展开。

4.1 相对海平面上升新兴风险

4.1.1 自然海岸线后退预测

根据 Sentinel-1 获取的地面沉降监测信息结合多年海平面上升数据,将天津地区的相对海平面平均上升速率定为 19.2 mm/a。将天津市南部平原区划分 1 km×1 km 的规则格网,取格网内沉降点的平均值作为该格网的沉降值叠加海平面上升数据与天津市高程数据对比,对天津市自然海岸线后退面积进行 5~20 a 的估计,结果如图 6 蓝色区域所示,预计 5~20 a 自然海岸线后退面积不容乐观。分析原因首先未考虑围海造田的因素,将大部分区域视为海域,其次未考虑天津市 139.62 km 的海堤和海挡工程<sup>[23]</sup>,因而造成后退面积较实际情况相差很大的结果。

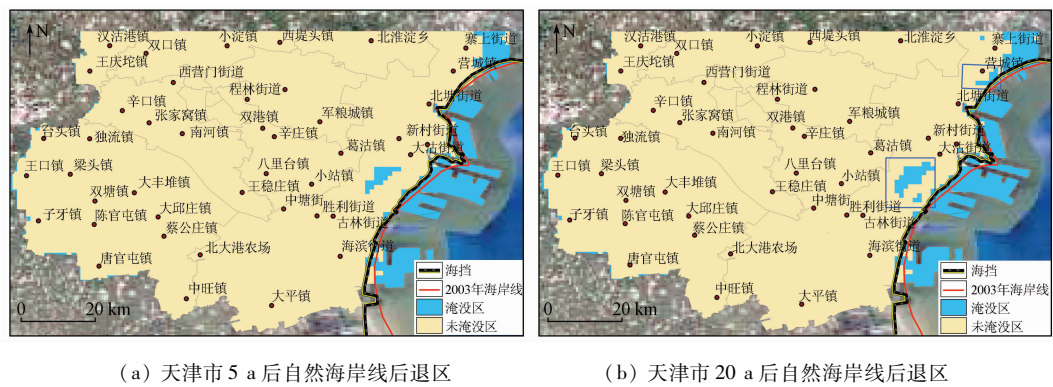


图 6 叠加作用下的天津沿海淹没区

Fig. 6 The inundated area of Tianjin coastal area under the superimposed action

综上,排除围海造田的面积和沿海堤坝可以保护的地区,预计 5 a 后,寨上街道、营城街道和北塘街道等地区的海岸线后退面积约为 28 km<sup>2</sup>, 20 a 后,面积加剧至 87 km<sup>2</sup>,从图 6 中可以看出增加的淹没区域影响因素可能不仅仅是由于海平面上升,预测淹没区域多集中于沿海建筑设施和水域地区,城市低洼地区的内涝也是重要因素。因此分析天津市地面沉降和海平面上升的叠加作用,建设重点区域海堤标准为 200 a 一遇、一般段标准达到 50 ~ 100 a 的海堤以及严格限制围海造田刻不容缓。

4.1.2 相对海平面上升新兴风险评估

对研究区土地利用现状进行地物信息提取,将地物分为耕地、植被、建设用地、水域和晒盐场 5 类。具体空间分布情况如图 7 所示。综合考虑区域地质、水文地质环境系统和人类活动,结合区域影响城市安全的环境、风险因子和城市本身抗风险能力的特征,选取地面沉降变化量、地下水位变化量、建筑用地、耕地、水域、植被、距离海岸线距离和高程等影响因子,继续采用 XGBoost 集成算法进行地面沉降与海平面上升叠加作用引发的城市安全新兴风险评估。

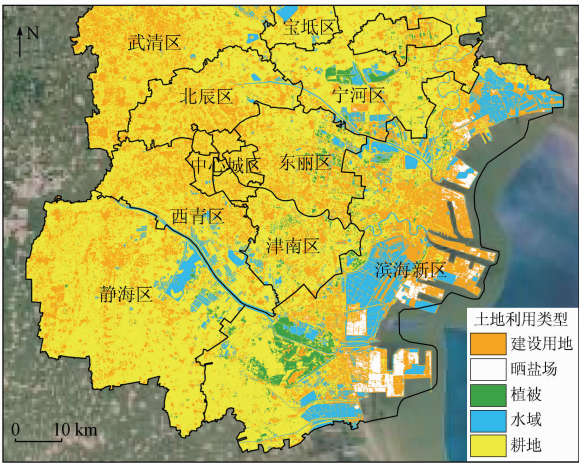


Fig. 7 Present situation of land use in southern plain area of Tianjin

1) XGBoost 模型建立。对多因子进行数据清洗之后,使用 XGBoost 集成算法对数据进行训练,与研究入海量影响因素所使用的参数不同,重新定义参数为  $base\_score = 0.5$ ,  $colsample\_bytree = 1$ ,  $learning\_rate = 0.300\ 000\ 012$ ,  $max\_delta\_step = 0$ ,  $max\_depth = 6$ ,  $min\_child\_weight = 1$ ,  $random\_state = 0$ ,  $reg\_alpha = 0$ ,  $validate\_parameters = 1$ ,  $verbosity = None$ ; 在此基础上,对比预测值的曲线和实际的曲线,如图 8 所示,从图 8 中可以看出预测结果与实际基本吻合,准确率为 85%,计算均方误差(mean squared error, MSE)为 10.179 1,平均绝对误差(mean absolute error, MAE)为 2.211 6,结果与使用同类算法的研究结果持平。最后,根据模型生成过程中的信息,得到特征的重要性,按 F - score 降序排序,作为特征值的贡献度。

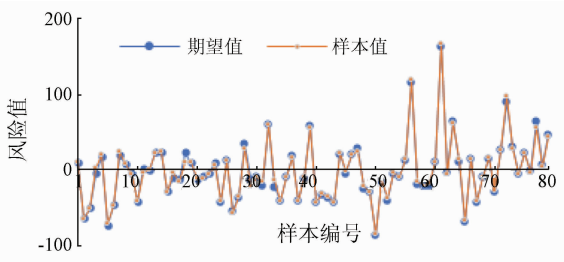


Fig. 8 XGBoost regression curve

2) 相对海平面上升新兴风险分析。在获取天津市沿海地区地面沉降信息基础上,结合现有城市地物分类标准,在相对海平面上升的背景下,结合 XGBoost 模型,合理划分出天津市城市安全风险区,采用上四分位数和下四分位数将研究区划分为高风险区、中等风险区、低风险区。城市高风险地区为王庆坨、独流、台头和大丰堆等沉降中心区以及营城和大沽街道的沿海地区;中风险地区唐官屯、梁头等地区以及天津市大部分沿海地区,剩余地区为低风险地区,如图 9 所示。

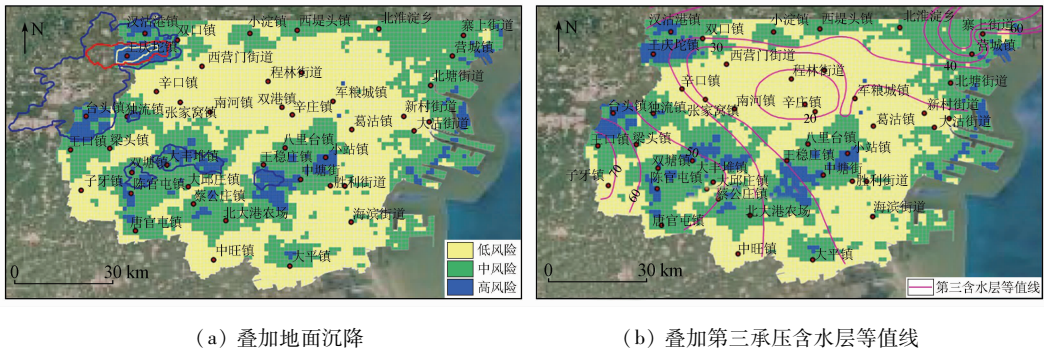


图 9 城市安全结果与地面沉降、第三承压含水层等值线结果叠加

Fig. 9 Superimposing the urban safety results on the ground subsidence and the groundwater funnel

将上述结果叠加地面沉降和地下水漏斗地区，可以发现高风险地区与地面沉降中心区高度吻合。根据图 10 的 F-score 重要性排列，地面沉降、第三承压含水层水位变化、距海岸线距离的重要性排在前三位。可以说明，在所有影响因素中地面沉降是最主要因素；其次地下水水位变化也对城市安全有一定影响，例如区域内存在地下水漏斗且面积扩大、深度加深这都对城市发展带来不利影响，超量开采地下水，地下水位大幅下降不仅导致地面沉降，同时破坏咸淡水平衡进而引发海水入侵；最后天津市为沿海城市，距离海岸线的距离决定该地是否存在发生风暴潮、海水入侵和内涝的风险。

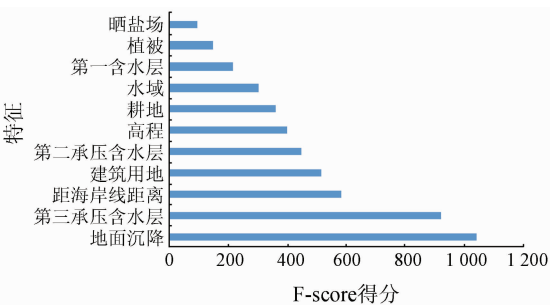


图 10 城市安全影响因素的重要性排序

Fig. 10 Importance ranking of factors affecting urban safety

通过获取的相对海平面年际变化量，预测天津市自然海岸线后退情况。结合已有的其他数据资料，引入 XGBoost 机器学习法，从地球科学角度分析海平面上升与地面沉降叠加作用与城市安全问题。未来将继续考虑天津市相对海平面上升的保守情景和悲观情景的海水淹没模拟，以期获得更准确的数据资料作为科学依据和重要指标，建立陆海（包括入海河流）统筹的海岸带地质与生态环境监测评价系统，提高沿海地区抵御灾害的能力。

4.2 南水北调 - 地下空间开发利用新兴风险

4.2.1 南水北调 - 地面沉降

根据多年的地面沉降实践证明，通过大规模水源转换工程，减少地下水开采量，促进地下水的抬

升，进而缓解地面沉降。目前能够从文献中可以查到南水北调天津干线方案分水井包括曹庄、西河、永清渠和子牙河北分流井等<sup>[24]</sup>，整合方案并从水资源公报上获得的南水北调天津干线分水井信息，在天津市南水北调工程主要实施的大型水库和水厂附近 1 km 缓冲区提取样点，叠加地面沉降背景如图 11 所示，发现王庆坨水库缓冲区内沉降一直在加剧，其次是芥园水厂，而凌庄水厂、西河泵站和新开河水厂沉降有所缓解。计算样点年沉降量曲线如图 12 所示。大型水库主要选择王庆坨水库和团泊洼水库，水厂选择新开河水厂、西河泵站、曹庄泵站和津滨水厂。除津滨水厂附近不存在沉降以外，2014 年南水进津，发现从 2014—2015 年王庆坨水库、新开河水厂、西河泵站和曹庄泵站的沉降都较 2013—2014 年有所加剧。考虑地下水位抬升具有滞后性，从 2015 年开始，新开河水厂、西河泵站和曹庄泵站的沉降都

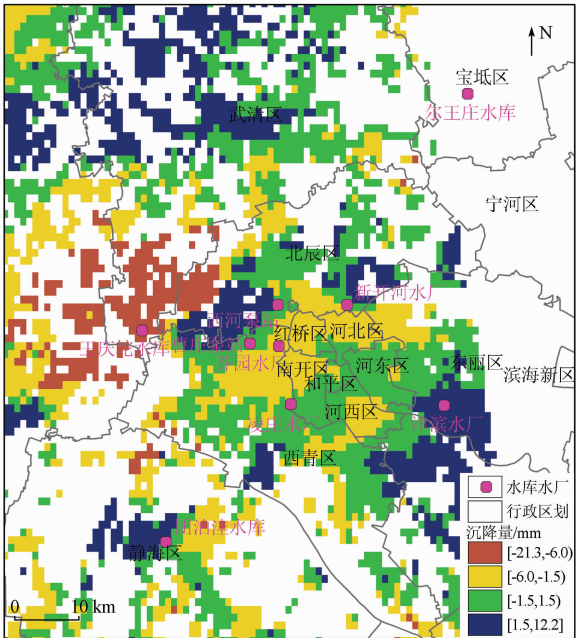


图 11 天津市南水北调水站水厂沉降

Fig. 11 Subsidence of water plant of Tianjin South - to - North Water Diversion Project

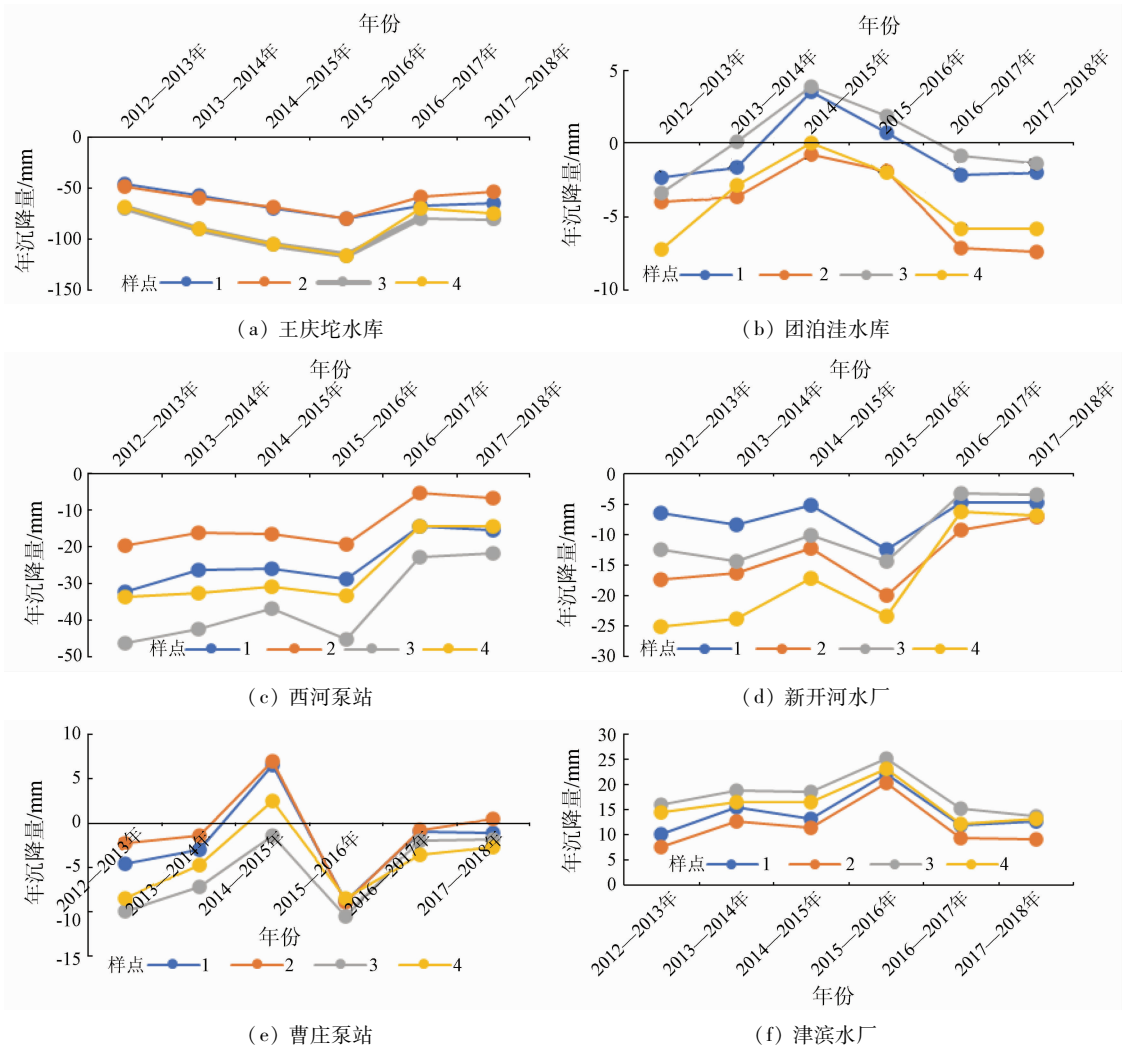


图 12 天津市南水北调水站水厂年沉降量折线图

Fig. 12 Annual settlement of water plant of Tianjin South - to - North Water Diversion Project

有所缓解,王庆坨水库的沉降依然严重。值得注意的是,团泊洼水库从 2015 年开始出现沉降。整体来说,随着南水北调工程的实施,天津地区水源得到了极大的补给,地面沉降状况明显改善。

从地面沉降防治角度,南水进津最大的优势在于缓解了天津市城区用水压力。未来,在掌握区域地面沉降时空演化规律和多元驱动机理基础上,在地面沉降约束条件下,可结合南水受水新水情和地层物理力学特性,评价区域浅地表空间工程建设适宜性,提供工程应对措施;结合中深部地下水可更新能力、贮水恢复条件和区域水质情况,评价区域分层、分质地下水开发适宜性。

4.2.2 地下空间开发(地铁) - 地面沉降

天津市地下空间开发主要分析地铁运行对地面沉降影响。截至 2019 年,天津轨道交通开通运营地铁线路共有 6 条,分别是 1 号线、2 号线、3 号线、5 号线、6 号线和 9 号线。将地铁线路矢量化后叠加到以年沉降量为背景上并计算缓冲区内 2012—2018 年间年沉降量,发现这些地铁线路穿过多个地

面沉降活跃区,这给天津地铁的建设施工及建成后的平稳运营带来了安全隐患(图 13)。地铁 1 号线、3 号线、5 号线和 6 号线向北延伸方向均穿过沉降速率较大的区域。尤其是 1 号线向西北延伸至武清的王庆坨沉降中心区,2012—2018 年间年沉降量均达到 20 mm 以上,成为天津市地铁线中受地面沉降影响最大的线路。3 号线和 5 号线的北端和南端都位于年沉降量在 10 mm 左右的区域,虽然从 2017 年 3 号线的职业大学站,5 号线的天士力站、华北集团站附近开始沉降有所减缓,但是仍位于沉降量较大的区域。此外,从图 13 中可以看出,地铁 9 号线自东丽开发区站开始即位于年沉降量在 10 mm 的地区,至小东庄站开始延伸至滨海新区,大部分位于 20 mm 的年沉降量区。与 1 号线、3 号线和 5 号线不同的是,9 号线开往滨海新区,结合上文分析的地面沉降叠加海平面上升的双重作用,使得对地铁 9 号线的分析,除了要考虑地面沉降带来的风险外,沿海地区带来的风险因素也不容忽视。

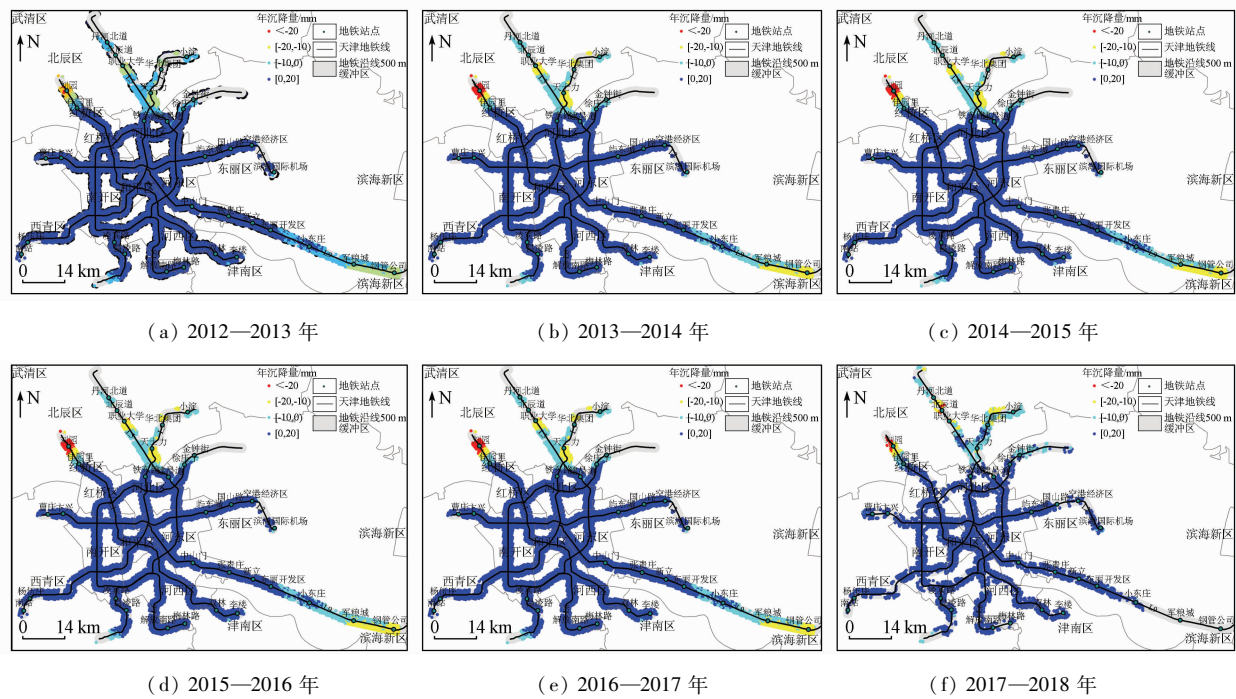


图 13 天津市地铁线缓冲区年沉降量

Fig. 13 Annual settlement of Tianjin metro line buffer zone

总结发现天津市 1 号线、3 号线、5 号线和 9 号线地铁向市郊延伸方向均穿过地面不均匀沉降严重区域。一方面需要通过进一步控制地下水开采,减缓地下漏斗发育;另一方面在南水进津的有利条件下,采用地下水回灌,补充地下水储备,从而有效控制地面沉降。此外在地铁线路发展规划的过程中市郊可以广泛建设地上轨道交通,减少地面沉降带来的危害。

5 结论

本研究选取天津南部平原区为研究区,利用 SBAS - InSAR 技术,获取地面沉降监测信息。在此基础上,继续对天津地面沉降对海平面响应进行分析。此外,随着南水北调 - 地下空间开发影响不断加深,由此针对这些技术与地面沉降的相互作用进行分析,具体结论如下:

1) 通过使用小基线技术处理 2012—2016 年的 Radarsat - 2 和 2016—2018 年的 Sentinel - 1 数据,获取天津市地面沉降信息。将渤海海平面高度数据叠加沿海地区地面沉降年均沉降量并对比高程数据,排除围海造田的面积和沿海堤坝可以保护的地区,预计 5 a 后,自然海岸线后退面积约为 28 km<sup>2</sup>, 20 a 后,后退面积加剧至 87 km<sup>2</sup>。进一步引入 XG-Boost 集成算法对天津市城市安全(受地面沉降和海平面上升叠加作用影响)进行评估,发现高风险区

与地面沉降中心区高度吻合,中风险地区为天津市大部分沿海地区。

2) 根据已有资料叠加沉降结果发现南水进津可能将是全面治理地面沉降的契机。而地铁工程结构本身会因为建设和运营而沉降。地面沉降又会导致加重轨道形变,影响地铁运行速度。

研究取得了一些成果,但仍存在如下不足之处,对相对海平面上升新兴风险的分析较为粗糙,因能获取的数据过少,数据来源单一没有变化且多数据源的标准化问题,选择影响因子较少,影响因子存在不够全面的情况,未来考虑加入地表径流以及其他文献中使用的地形因子(坡度和坡向),使结果更具说服力。在对南水北调 - 地下空间开发利用新兴风险进行分析时,由于南水北调时序较短,也由于数据获取和量化工作存在难度,预测结果仅仅是探索性工作,这些都有待于进一步探究。

参考文献(References):

[1] 于海若,宫辉力,陈蓓蓓,等. 新水情下利用 InSAR - GRACE 卫星的新兴风险预警与城市地下空间安全展望[J]. 国土资源遥感,2020,32(4): 16 - 22. doi:10. 6046/gtzyyg. 2020. 04. 03.  
Yu H R, Gong H L, Chen B B, et al. Emerging risks and the prospect of urban underground space security based on InSAR - GRACE satellite under the new hydrological background[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(4): 16 - 22. doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020. 04. 03.

[2] 胡俊杰,蒙爱军. 天津地区的相对海平面上升与地面沉降[J].

- 海洋信息,2005(2):17-19,7.
- Hu J J, Meng A J. Relative sea level rise and land subsidence in Tianjin [J]. Ocean Information, 2005(2):17-19,7.
- [3] 吕传振,刘凯旋. 天津地区地铁沿线地面沉降特征分析[J]. 北京测绘,2020,34(9):3.
- Lyu C Z, Liu K X. Analysis of land subsidence characteristics along subway in Tianjin [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2020, 34(9):3.
- [4] Cole G. A discussion on problems associated with the subsidence of southeastern England: The east coast and London tidal flood warning systems [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1972, 272(1221):173-178.
- [5] Mazzotti S, Lambert A, Kooij M V D. Impact of anthropogenic subsidence on relative sea-level rise in the Fraser River delta [J]. Geology, 2009, 37(9):771-774.
- [6] Mazzotti S, Lambert T, Kooij M V D. Coastal subsidence and relative sea-level rise in the Fraser River delta, Greater Vancouver, BC, from a combined CTM-InSAR, GPS, leveling, and tide gauge analysis [C]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2008.
- [7] Esra E, Cristian R. The worsening impacts of land reclamation assessed with Sentinel-1: The Rize (Turkey) test case [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006(74):57-64.
- [8] Miller K G, Sugarman P J, Browning J V. Sea-level rise in New Jersey over the past 5000 years: Implications to anthropogenic changes [J]. Global and Planetary Change, 2009, 66(1-2):10-18.
- [9] Sannekevan A, Gilles E, Esther S, et al. The relative contribution of peat compaction and oxidation to subsidence in built-up areas in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands [J]. Science of the Total Environment, 2018(636):177-191.
- [10] Sun H, Grandstaff D, Shagam R. Land subsidence due to groundwater withdrawal: Potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey [J]. USA. Environmental Geology, 1999, 37(4):290-296.
- [11] Abidin H Z, Andreas H, Gamal M. Land subsidence characteristics of the Jakarta basin (Indonesia) and its relation with groundwater extraction and sea level rise [J]. Groundwater Response to Changing Climate, 2010(1):113-130.
- [12] Abidin H Z, Andreas H, Gumilar I. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development [J]. Natural Hazards, 2011, 59(3):1753-1771.
- [13] Abidin H Z, Andreas H, Gumilar I. On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta [J]. IAHS-AISH Proceedings and Reports, 2015, 370:15-20.
- [14] 李响,段晓峰,张增健,等. 中国沿海地区海平面上升脆弱性区划[J]. 灾害学,2016,31(4):103-109.
- Li X, Duan X F, Zhang Z J, et al. Vulnerability zoning of sea level rise in coastal areas of China [J]. Disaster Science, 2016, 31(4):103-109.
- [15] 谢翠娜,许世远,胡蓓蓓,等. 地面沉降对天津滨海地区风暴潮灾危险性影响评价. 世界地理研究, 2009, 18(4):126-133.
- Xie C N, Xu S Y, Hu B B, et al. Assessment of land subsidence influence on storm surge risk in Tianjin Binhai area [J]. World Regional Studies, 2009, 18(4):126-133.
- [16] 张永红,丁炜,何静,等. 基于XGBoost的雅江流域孕灾环境危险性分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 3(9):1-10.
- Zhang Y H, Ding W, He J, et al. Risk analysis of hazard-pregnant environment in Brahmaputra based on XGBoost [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 3(9):1-10.
- [17] 宫思艺,孔宪光,刘丹,等. 融入复杂地层动态识别的盾构施工地表沉降预测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6):228-236.
- Gong S Y, Kong X G, Liu D, et al. An approach for predicting shield construction ground surface settlement of complex stratum using dynamical strata identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6):228-236.
- [18] 林报嘉,刘晓东,杨川,等. XGBoost机器学习模型与GIS技术结合的公路崩塌灾害易发性研究[J]. 公路, 2020, 65(7):20-26.
- Lin B J, Liu X D, Yang C, et al. Avalanche susceptibility assessment of highway based on XGBoost machine learning model and GIS technology [J]. Highway, 2020, 65(7):20-26.
- [19] Zhao T A, Zheng S H, Li W L, et al. A study of the credit risk analysis based on XGBoost [J]. Software Engineering, 2018, 21(6):29-32.
- [20] Guo L, Gong H L, Zhu F. Analysis of the spatiotemporal variation in land subsidence on the Beijing plain, China [J]. Remote Sensing, 2019, 11(10):1170.
- [21] 郭良迁,薄万举,陈宇坤,等. 天津地区的垂直形变与构造活动研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(5):1-5.
- Guo L Q, Bo W J, Chen Y K, et al. Vertical deformation and tectonic activity in Tianjin area [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(5):1-5.
- [22] 白泽朝,靳国旺,张红敏,等. 天津地区 Sentinel-1A 雷达影像 PS-InSAR 地面沉降监测 [J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(3):6.
- Bai Z C, Jin G W, Zhang H M, et al. Subsidence monitoring of Tianjin using PS-InSAR technique with Sentinel-1A [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(3):6.
- [23] 邵继彭. 扩大天津东部防潮防线范围完善防潮体系探讨 [J]. 海河水利, 2019(1):18-19, 29.
- Shao J P. Discussion on expanding the scope of dampproof defense line in the east of Tianjin and perfecting the dampproof system [J]. Haihe Water Conservancy, 2019(1):18-19, 29.
- [24] 王威,王森,韦劲松,等. 南水北调中线工程与天津地面沉降防治关系研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3):22-26.
- Wang W, Wang M, Wei J S, et al. Relationship between the middle route of South-to-North Water Diversion Project and land subsidence control in Tianjin [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology, 2012, 10(3):22-26.

Emerging risk assessment of areas subject to land subsidence  
in the southern plain of Tianjin, China

YU Hairuo<sup>1,2,3</sup>, GONG Huili<sup>4,5,6,7,8,9</sup>, CHEN Beibei<sup>4,5,6,7,8,9</sup>, ZHOU Chaofan<sup>4,5,6,7,8,9</sup>

(1. School of Public Administration, Shandong Technology and Business University, Yantai 264005, China; 2. Key Laboratory of Surveying and Mapping Science and Geospatial Information Technology of MNR, CASM, Beijing 100039, China; 3. State Key Laboratory of Geo – Information Engineering, Xi’an 710054, China; 4. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 5. The Key Lab of Resource Environment and GIS of Beijing, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 6. Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 7. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, MOE, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 8. Key Laboratory of Mechanism, Prevention and Mitigation of Land Subsidence, MOE, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 9. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The development of emerging technologies poses some risks while improving urban construction and human life, thus further causing urban safety problems. Tianjin is a coastal city in China, where the coastal sea level keeps increasing, water cycling is changed by the water supply of the South – to – North Water Diversion Project, and the underground space is subject to development and utilization. These factors, coupled with land subsidence, are all critical for the assessment of emerging risks in Tianjin. This study extracted information on the land subsidence of the southern plain in Tianjin and then predicted the retreat of the natural coastline in Tianjin by combining the sea level rise rate. Accordingly, this study predicted the high – risk factors brought by relative sea level rise in Tianjin using a machine learning method (XGBoost). In addition, this study analyzed the emerging risks caused by the South – to – North Water Diversion Project and the development and utilization of underground space and revealed the response patterns of the water supply and the construction and operation of subways to the urban safety of Tianjin. The study on the emerging risks brought about by the combination of land subsidence and modern human activities will provide a scientific basis for regional disaster prevention and mitigation and improve cities’ ability to resist disasters.

**Keywords:** land subsidence; emerging risk; relative sea level rise; XGBoost

(责任编辑: 陈 理)