

doi: 10.12029/gc20180603

刘宏伟, 杜东, 许静波, 马震, 赵青松, 裴艳东, 胡云壮, 苗晋杰, 白耀楠, 张竞. 2018. 基于 PSInSAR 技术的山东半岛蓝黄交迭区地面沉降发育特征与影响因素识别[J]. 中国地质, 45(6): 1116–1127.

Liu Hongwei, Du Dong, Xu Jingbo, Ma Zhen, Zhao Qingsong, Pei Yandong, Hu Yunzhuang, Miao Jinjie, Bai Yaonan, Zhang Jing. 2018. Characteristics and affecting factors of land subsidence identification based on PSInSAR measures in Shandong Peninsula Blue–Yellow Overlapping Economic Zone[J]. Geology in China, 45(6):1116–1127 (in Chinese with English abstract).

基于 PSInSAR 技术的山东半岛蓝黄交迭区地面沉降发育特征与影响因素识别

刘宏伟¹ 杜东¹ 许静波² 马震¹ 赵青松³
裴艳东¹ 胡云壮¹ 苗晋杰¹ 白耀楠¹ 张竞¹

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 潍坊市国土资源局, 山东 潍坊 261000;
3. 河北省地矿局第五地质大队, 河北 唐山 063000)

摘要: 研究区位于山东半岛蓝色经济区和黄河三角洲高效生态经济区的交迭地带, 区位优势明显。地面沉降灾害的发生对该区规划建设和港口防潮堤高程构成了威胁, 因此, 全面了解该区地面沉降的发育特征, 尤其是掌握地面沉降的主要影响因素极其重要。前人在不同时段内应用 GPS 和水准测量方法对该区局部地段地面沉降开展了相应研究, 但未对全区地面沉降状况进行分析评价, 尚不能有效支撑区域规划建设及地面沉降防控管理。文章在前人研究基础上, 基于 PSInSAR 遥感技术分析了该区地面沉降速率及其变化状况, 并与水准测量成果进行了对比。认为多年来该区地面沉降现象明显, 超过 75% 的区域发生了不同程度的地面沉降, 在寿光—广饶交界处、寿光—滨海开发区北部、寿光城区西北部和昌邑—滨海开发区北部等存在多个显著片区, 且多年变化总体呈现加重趋势; 区内存在 16 个沉降中心, 最大沉降速率达到 29~168 mm/a, 沉降速率超过 40 mm/a 的占比达到 62% 以上, 主要分布于研究区西部和西北部; 该区地面沉降受区域构造、地层结构、地下水开采和地面荷载等因素影响, 其中地下水开采是区域地面沉降发生的主致因素, 地面荷载加强了局部地段的不均匀沉降程度, 区域构造和地层结构为地面沉降发育和加剧提供了地质背景条件。

关键词: 地面沉降; PSInSAR; 水准测量; 评价; 影响因素; 山东半岛

中图分类号: P542.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)06-1116-12

Characteristics and affecting factors of land subsidence identification based on PSInSAR measures in Shandong Peninsula Blue–Yellow Overlapping Economic Zone

LIU Hongwei¹, DU Dong¹, XU Jingbo², MA Zhen¹, ZHAO Qingsong³, PEI Yandong¹,
HU Yunzhuang¹, MIAO Jinjie¹, BAI Yaonan¹, ZHANG Jing¹

收稿日期: 2018-05-27; 改回日期: 2018-07-20

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160229, 12120113003800)、国家自然科学基金项目(41602205)和中丹地质调查局国际合作项目(SUBSOL)联合资助。

作者简介: 刘宏伟, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事环境地质、海水入侵等研究工作; E-mail: liuheny022@163.com。

通讯作者: 杜东, 男, 1981 年生, 高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质等研究工作; E-mail: yndd24@163.com。

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Weifang Bureau of Land Resources, Weifang 261000, Shandong, China; 3. No. 5 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration of Hebei Province, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: The study area is located along the overlapping zone of the Shandong Peninsula Blue Economic Zone and the Yellow River Delta Highly Efficient Ecological Economic Zone, showing important location advantages. The occurrence of land subsidence disasters has posed threats to the planning and construction of the city and the tide dike height of the port. Therefore, it is utmost important to fully recognize the characteristics of land subsidence and, in particular, to identify the main factors affecting land subsidence. Previous researches have been mainly focused on partial area using GPS and leveling survey methods without covering the whole area, which cannot support the regional city planning efficiently. Based on previous researches, the authors used PSInSAR measuring to analyze the land subsidence rate and its variation in the whole region in comparison with the leveling survey results. The results show that land subsidence has been evidently covering 75 percent of the area in recent years where there have appeared several flat districts at the junctions of Shouguang–Guangrao, northern location of Shouguang–Binhai Development Zone, northwestern Shouguang downtown, and northern location of Changyi–Binhai Development Zone, and there is an increasing trend for the harm degree of land subsidence. There are 16 settlement centers whose maximum settlement rate has reached 29–168 mm/a, and the rates of 62 percent of centers exceed 40mm/a, which are distributed in the west and northwest of the study area. Fault structure, stratigraphic structure, groundwater exploitation and ground load are the influencing factors of land subsidence, among which groundwater exploitation is the main factor of regional land subsidence, and the ground load enhances the uneven settlement of local sections, while the fault structure and stratigraphic structure provide geological background conditions for the development of land subsidence.

Key words: land subsidence; PSInSAR; leveling survey; evaluation; affecting factors; Shandong Peninsula

About the first author: LIU Hongwei, male, born in 1982, senior engineer, majors in research on environmental geology and seawater intrusion; E-mail: liuhenry022@163.com.

About the corresponding author: DU Dong, male, born in 1981, senior engineer, majors in research on environmental geology; E-mail: yndd24@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160229, No.12120113003800), National Natural Science Foundation of China(No.41602205)and International cooperation projects between CGS and GEUS(No.SUBSOL).

1 引言

地面沉降是在人类工程经济活动影响下,由于地下松散地层固结压缩而导致地壳表面标高降低的一种地质现象,目前已成为一个世界性的地质环境问题(Galloway et al., 1998; Bawden et al., 2001; Pacheco–Martínez et al., 2013; 郭海朋等, 2017)。据文献统计,全球已有 150 多个国家和地区受到地面沉降的影响(Tomas et al., 2010),中国也有 50 多个城市相继出现地面沉降,其中华北平原、汾渭盆地和长江三角洲地区已成重灾区(房浩等, 2016)。山东半岛蓝黄交迭区位于华北平原东缘、沂沭断裂(郯庐断裂)分布区,是中国最大的蔬菜种植和较大规模的卤水化工产业基地,地下水长期处于过量开采状态,加之滨海地段的大规模开发建设,致使地面沉降问题日趋突出。

该区不同地段内已开展过多期 GPS 和水准测量(肖国强, 2010; 刘宏伟, 2017),这些测量方法具有监测精度高、数据相对连续的优点,可为地面沉降研究提供良好基础。但是也存在不少缺点,例如野外测量工期往往持续时间较长,监测点呈块状分布且覆盖面积较小,无法获取地面沉降的整体发育特征,这些给区域地面沉降的分析工作带来较大困难。随着空间监测技术的发展,合成孔径雷达差分干涉测量(DInSAR)技术因其实时动态、覆盖范围广等特点被成功应用于地面沉降监测(Tomas et al., 2014)。之后,永久散射体差分干涉测量技术(PSInSAR)逐渐发展起来,该方法能够有效克服DInSAR空间、时间去相干和大气延迟引起的误差,显著提高了地面形变的监测精度,目前已成为区域地面沉降调查和监测的一种有效方法(Ferretti et al., 2000; 葛大庆等, 2007; 李曼等, 2016; 雷坤超等,

2016)。

本次基于2012—2014年17景RadarSAT-2雷达卫星影像数据,应用PSInSAR技术对山东半岛蓝黄交迭区区域地面沉降的发育特征进行监测。同时,结合野外调查获取的地质构造、地层结构、地下水开采状况和地面荷载等数据资料,对地面沉降的主要影响因素进行识别,以期为该区域地面沉降防治和建设规划提供依据。

2 区域地质概况

研究区位于莱州湾南岸山东半岛蓝黄交迭区,涵盖寿光、昌邑、滨海开发区和潍坊市辖区,面积约5818.30 km²(图1)。属暖温带半湿润季风型气候区,地势南高北低,地形较为平坦,平均坡降0.47‰。区内地貌层次清晰,由南部山前冲洪积平原向北变化为冲积、海积平原,发育弥河、虞河、白浪河、潍河等多条河流。第四系沉积物由南向北增

厚,岩性分布具有一定规律性,由山前至冲洪积扇前缘依次为含砾砂、砂、砂质黏土和黏土,北部滨海沉积物岩性主要为粉细砂、黏质砂土、砂质黏土和黏土。

区内断裂构造发育,分布有唐吾—葛沟、沂水—汤头、安丘—莒县和昌邑—大店等多条断裂,形成了昌邑凹陷、牛头凹陷、东营凹陷、下营凸起、寒亭凸起、寿光凸起和广饶凸起等多个拗陷与隆起相间分布的构造格局。区内地下水开采强度较大,南部寿光等区县以种植蔬菜而全国闻名,同时也是山东省重要的粮食基地,蔬菜和粮食等作物的种植消耗了大量的地下淡水,地下水的持续开采,在该区形成了多个地下淡水降落漏斗;晚更新世以来北部滨海平原受沧州、献县、黄骅三次海侵形成了相互叠置的海陆相地层,海相地层中赋存的古海水受蒸发浓缩等作用的影响形成了盐度很高的卤水资源(刘宏伟等,2015),卤水资源的大量开采导致在研

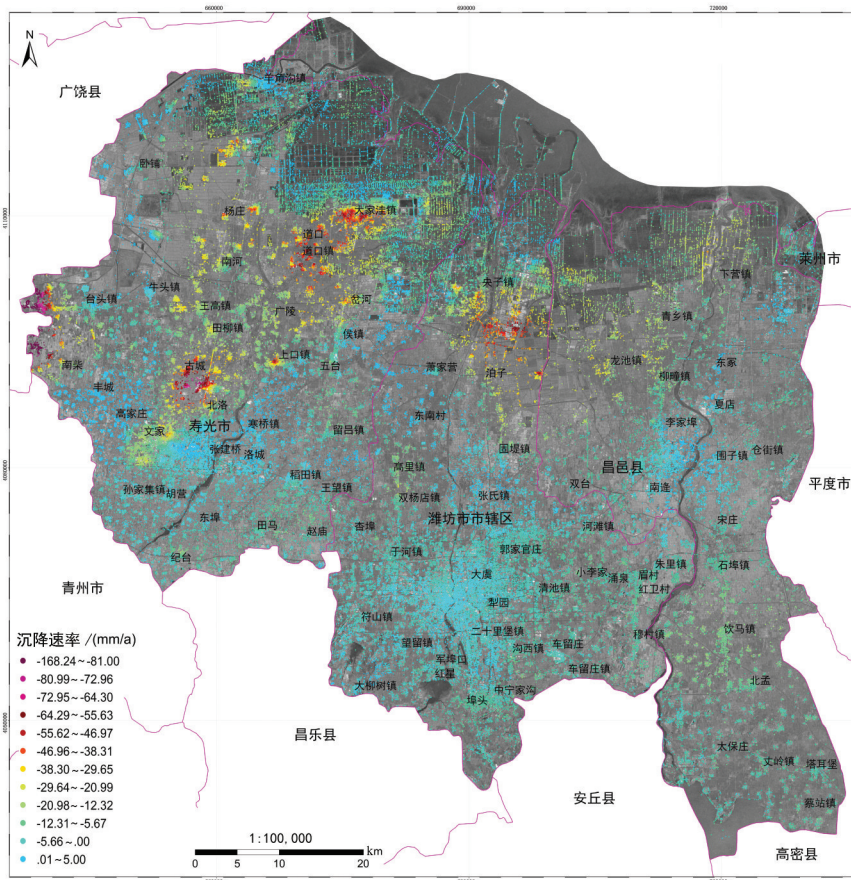


图1 研究区位置及地面沉降速率(2014)

Fig.1 Location of the study area and land subsidence rate during 2014

究区北部形成区域地下咸水降落漏斗。

3 地面沉降特征分析方法

3.1 地面沉降形变PSInSAR监测方法

永久散射体差分干涉测量技术(PSInSAR),是以选取散射特性和相位信息都较为稳定的地面像素点作为研究对象,通过对包括高程、地表形变以及大气引起的相位变化等相位数据的时空分析,获取可靠的地表形变信息。其主要步骤为影像配准、像元差分干涉处理、永久散射体选取、地表形变速率提取与地面垂向沉降速率解算(张金芝等,2013;雷坤超等,2016)。

3.2 地面沉降形变水准监测方法

水准测量,又称几何水准测量,是用水准仪和水准尺测定地面上两点间高差的方法。通过在地面两点间安置水准仪,观测竖立在两点上的水准标尺读数计算两点间的高差。本次使用DINI 03电子水准仪和条码式钢钢水准标尺进行操作,其主要步骤和技术按照《国家一、二等水准测量规范》(国家质量监督检验检疫总局,2006)执行。

3.3 地面沉降评价方法

依据《地质灾害危险性评估规范》(国土资源部,2015)和《地质环境承载能力评价与监测预警指标体系和技术方法》(中国地质调查局,2016)要求,地面沉降承载状态评价可分为区域地面沉降速率和沉降中心沉降速率评价两方面。区域地面沉降速率是指区域地面沉降年均沉降量,沉降中心沉降速率是指沉降中心每年的沉降量,具体评价分级标准见表1和表2。

表1 区域地面沉降速率分级标准

等级	I级	II级	III级	IV级	V级
沉降速率/(mm/a)	0~10	10~30	30~50	50~80	>80
沉降分级	轻微	一般	较严重	严重	极严重

表2 沉降中心地面沉降速率分级标准

等级	I级	II级	III级	IV级	V级
沉降速率/(mm/a)	0~20	20~40	40~60	60~100	>100
沉降分级	轻微	一般	较严重	严重	极严重

4 地面沉降发育特征与影响因素识别

4.1 地面沉降形变特征

根据InSAR监测数据显示,研究区内地面沉降发育较为明显,且呈片状分布特征,2012—2014年地面沉降区覆盖面积分别达到4973.21 km²、5526.62 km²和5329.33 km²。多年来,平均沉降速率超过30 mm/a的区域呈明显增加趋势(表3),以靠近广饶的南柴西北部地段和寿光最为明显。总体来看,区内存在4个地面沉降较为显著的片区:

4.1.1 寿光台头镇南柴西北部沉降片区形变特征

该区沉降中心位于化龙镇裴家岭村附近,周边分布有食品加工、新闻纸造纸、机械制造、子午轮胎等多家工厂,长期开采地下水以满足工业生产需求。受此影响,区内地面沉降现象极为明显,其中多年均沉降速率超过10 mm/a的区域达到56 km²(图2),沉降中心最大沉降速率高达94~168 mm/a,且呈现明显的逐年增高趋势。

4.1.2 大家洼—杨庄—南河—广陵—岔河沉降片区形变特征

该区沉降中心分布于大家洼、道口和杨庄东等地段,道口镇近年来刚完成农村楼房建设和改造任务,楼房建设后造成局部地段地面荷载加强;杨庄周边分布有纺织、包装制品等加工工厂,企业生产长期消耗地下水;大家洼—广陵—岔河一带处于生态化工产业园区,化工企业生产持续大量开采地下卤水。受上述因素的影响,该区多年均沉降速率超过10 mm/a的区域面积达到300 km²(图3),其中大家洼沉降中心最大沉降速率达到52~66 mm/a,道口沉降中心达到46~59 mm/a,杨庄东沉降中心达到36~50 mm/a,沉降速率均呈现逐年增高变化规律。

表3 2012—2014年地面沉降面积统计

Table 3 Area statistics of multi-year land subsidence

沉降速率/(mm/a)	面积/km ²		
	2012年	2013年	2014年
-80~-170	2.08	10.27	12.16
-50~-80	15.4	14.29	23.07
-30~-50	58.16	282.58	302.87
-10~-30	1486.84	2043.64	1971.93
0~-10	3410.72	3175.85	3019.29

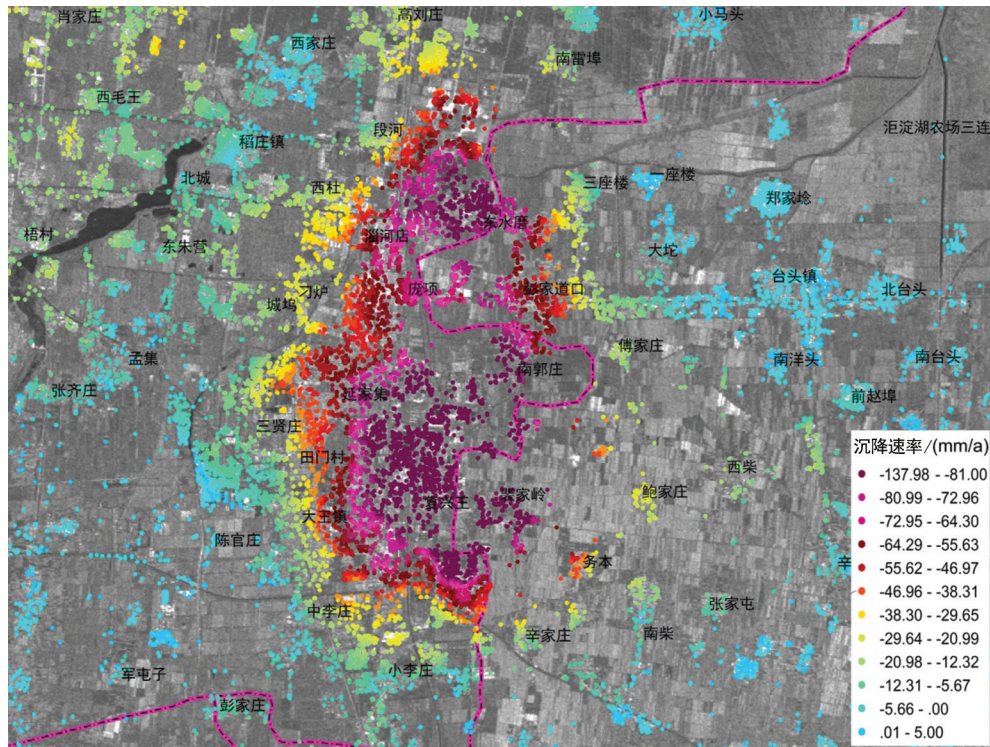


图2 南柴西北片区2012—2014年地面沉降速率
Fig.2 Land subsidence rate map of Nanchai northwest area during 2012—2014

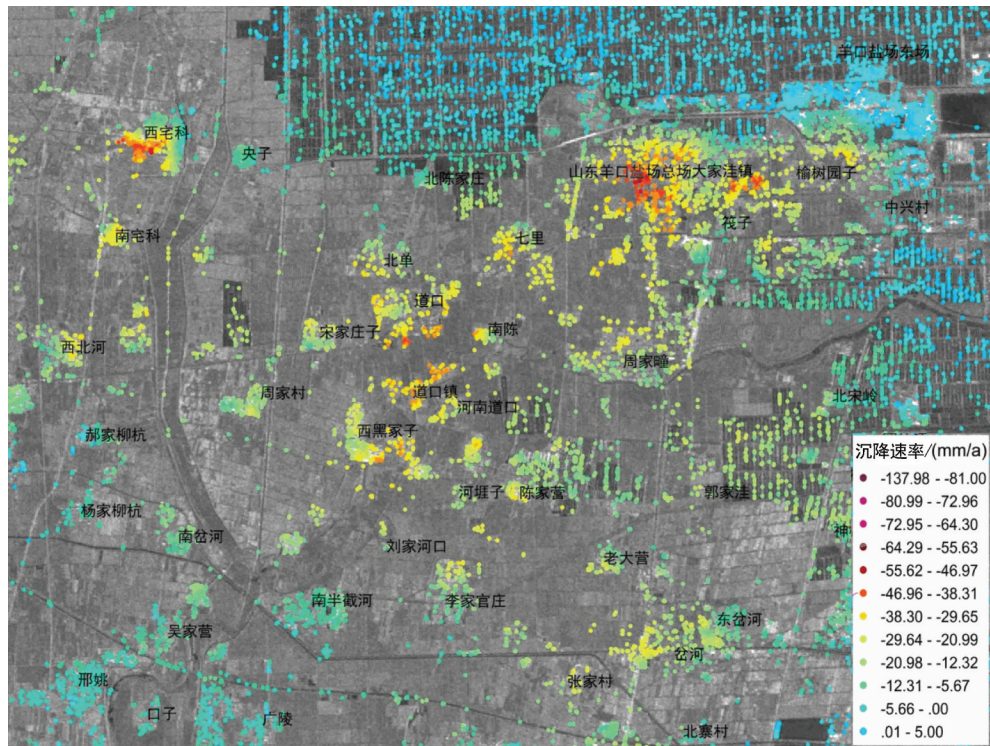


图3 大家洼—杨庄—南河—广陵—岔河片区2012—2014年地面沉降速率
Fig.3 Land subsidence rate map of Dajiawa-Yangzhuang-Nanhe-Guangling-Chahe area during 2012—2014

4.1.3 古城—北洛—寿光沉降片区形变特征

该区沉降中心位于文家、古城、兴源西路北段和西公孙庄等地段,该区处于蔬菜产业基地内,周边分布大量的蔬菜大棚和农田,长期开采地下水作为农灌水源。受地下水开采的影响,该区多年均沉降速率超过10 mm/a的区域面积达到87 km²(图4),其中文家沉降中心最大沉降速率达到29~44 mm/a,地面沉降呈现速率降低的加剧趋势;古城沉降中心达到45~64 mm/a,沉降速率呈现逐年增加趋势;兴源西路北段沉降中心高达69~80 mm/a,西公孙庄沉降中心达到35~55 mm/a,地面沉降呈现速率高一低一高的加剧变化趋势。

4.1.4 央子—泊子—固堤—龙池—青乡沉降片区形变特征

该区沉降中心分布于央子镇、崔家央子、潍县盐场、潍北农场总场、下营镇、青乡镇、龙池镇和柳疃镇等地段。该区位于滨海经济技术开发区内,近年来新建大量机械电子、新型材料、制盐和化工生产企业,区域性厂房建筑的建设对地面沉降造成一定影响;同时,制盐和化工生产需要持续、大量开采

地下卤水资源。受上述因素的影响,该区多年均沉降速率超过10 mm/a的区域面积达到400 km²(图5)。其中,崔家央子、潍县盐场、潍北农场总场和下营镇等沉降中心沉降速率达15~66 mm/a,呈现较为明显的逐年增高趋势;央子镇沉降中心速率为44~63 mm/a,地面沉降呈现速率高一低一高的加剧变化规律;青乡镇、龙池镇和柳疃镇沉降中心速率介于28~37 mm/a,地面沉降总体保持平稳加剧状态。

4.2 地面沉降发育状态评价

4.2.1 区域地面沉降评价

研究区多年均地面沉降区面积约4412.51 km²,且以轻微沉降区和一般沉降区为主。其中,轻微沉降区在区内广泛分布,面积约3412.12 km²;一般沉降区主要分布于研究区中北部、西南部地区和南部局部地段,面积约930.95 km²;较严重和严重沉降区分布于南柴北部、杨庄东、道口镇、大家洼、泊子北和古城—北洛之间地段,面积约64.62 km²;极严重沉降区分布于南柴西北部与广饶交界地段,面积约4.82 km²(图6)。

总体上,2012—2014年度地面沉降呈现逐年加

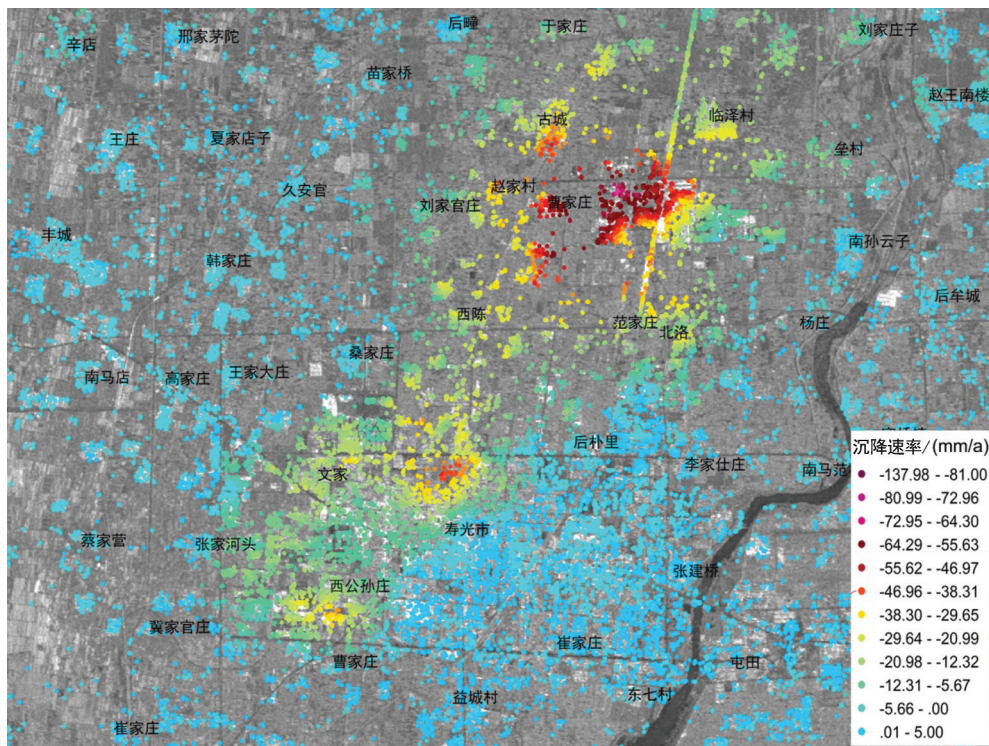


图4 古城—北洛—寿光片区2012—2014年地面沉降速率

Fig.4 Land subsidence rate map of Gucheng-Beiluo-Shouguang area during 2012-2014

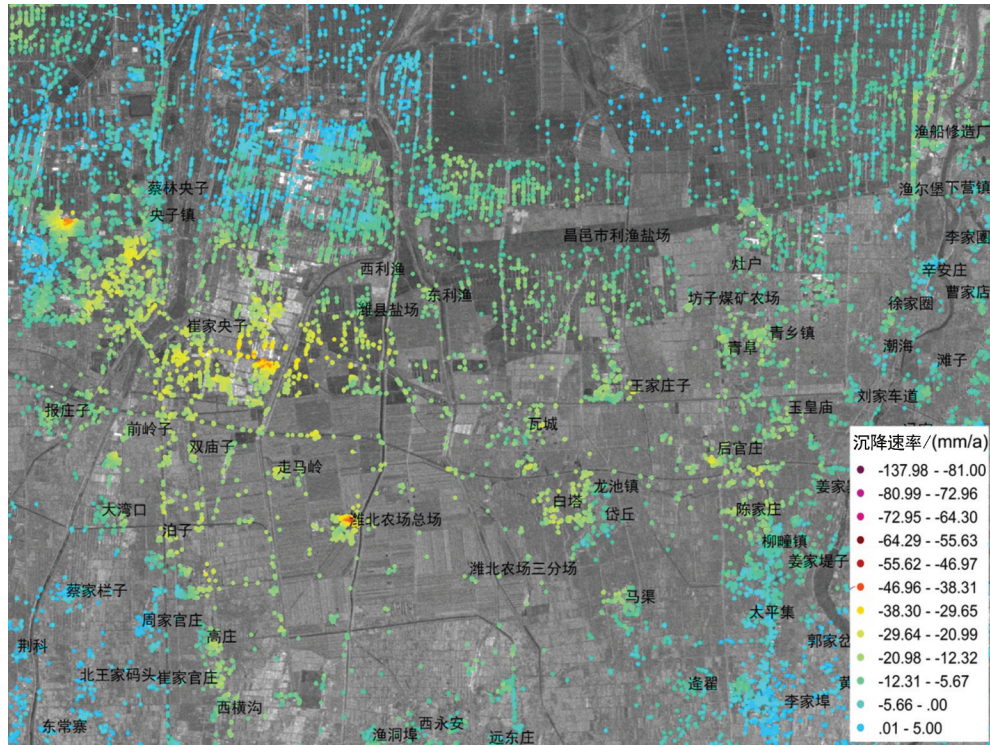


图5 央子—泊子—固堤—龙池—青乡片区2012—2014年地面沉降速率

Fig.5 Land subsidence rate map of Yangzi-Pozi-Gudi-Longchi-Qingxiang area during 2012-2014

表4 2012—2014年地面沉降评价分区

Table 4 Land subsidence evaluation divisions in different years

地面沉降分区	2012年		2013年		2014年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
极严重沉降区 (V级)	2.08	0.04	10.27	0.18	12.16	0.21
严重沉降区 (IV级)	15.40	0.26	14.29	0.25	23.08	0.40
较严重沉降区 (III级)	58.16	1.00	282.57	4.86	302.87	5.21
一般沉降区 (II级)	1486.84	25.55	2043.64	35.12	1971.93	33.89
轻微沉降区 (I级)	3410.72	58.62	3175.85	54.58	3019.29	51.89

剧趋势,其中较严重至极严重沉降区面积占比由1.30%上升至5.82%,一般沉降区由25.55%变化至33.89%(表4)。

4.2.2 沉降中心评价

从区域分布上来看,严重和极严重等级地面沉降中心主要分布于研究区西南部寿光区域,较严重等级地面沉降中心主要分布于研究区西北部滨海区域,一般等级地面沉降中心主要分布于研究区东北部昌邑区域。从不同年度变化趋势上来看,裴家岭、宅科村、大家洼、崔家央子、潍县盐城和下营镇

等6个沉降中心总体呈逐年加剧趋势,文家沉降中心呈现减缓趋势,其他沉降中心相对平稳(表5)。

4.3 地面沉降影响因素识别

4.3.1 地面沉降与区域构造响应关系

特殊的地质背景条件是发生地面沉降的内在因素。将地面沉降分区与主要断裂和沉积凹陷、凸起进行叠加(图6),发现该区地面沉降的空间分布具有较为明显的构造控制特性,地面沉降多发生在沉积凹陷区。其中,央子—泊子—固堤—龙池—青乡沉降区和下营北沉降区受研究区东部安丘—莒

表5 沉降中心地面沉降评价
Table 5 Evaluation of land subsidence center

区县	沉降中心	沉降等级			
		2012年	2013年	2014年	多年平均
寿光	裴家岭	IV级	V级	V级	V级
	道口镇	III级	III级	III级	III级
	宅科村	II级	III级	III级	III级
	西公孙庄	III级	II级	III级	III级
	文家	III级	II级	II级	II级
	兴源西路北段	IV级	IV级	IV级	IV级
滨海	古城	III级	III级	III级	III级
	大家洼	III级	III级	IV级	III级
	央子镇	III级	IV级	III级	III级
	崔家央子	III级	III级	IV级	III级
	潍县盐城	II级	III级	III级	III级
昌邑	潍北农场总场	III级	IV级	III级	III级
	下营镇	I级	II级	II级	II级
	青乡镇	II级	II级	II级	II级
	龙池镇	II级	II级	II级	II级
	柳疃镇	II级	II级	II级	II级

县、沂水—汤头、柳疃断裂等多条断裂的影响,与昌邑凹陷十分吻合;大家洼—杨庄—南河—广陵—岔河沉降区、南柴西北沉降区、王高沉降区以及古城—北洛

—寿光沉降区大部分区域,尤其是较严重至极严重沉降区受研究区西部郯郚—葛沟、古城—濰河口、上五井等断裂的作用,与牛头凹陷区吻合较好;羊角沟、沟西镇和中宁家沟等小片沉降区也分布于东营凹陷和坊子凹陷区范围内。总体而言,主要沉降区区域发育特征与断裂走向和凹陷的分布具有明显的对应关系,区域基底构造控制作用十分明显。

此外,杨庄—南河、大家洼—岔河沉降片分布在广饶凸起东部和双河凸起西部断裂交叉地段,说明研究区地面沉降发育除受断裂和构造的区域控制外受地下水开采等其他因素影响明显。

4.3.2 地面沉降与地层结构响应关系

除受区域构造影响明显外,地层结构(岩性、沉积相)也是影响研究区地面沉降的内在因素。从区域地层沉积相来看(刘宏伟等,2017),央子—泊子—固堤—龙池—青乡、大家洼—杨庄—南河—广陵—岔河和下营北等大片沉降区主要处于于下三角洲平原、上三角洲平原和湖积浅平洼地分布区,南

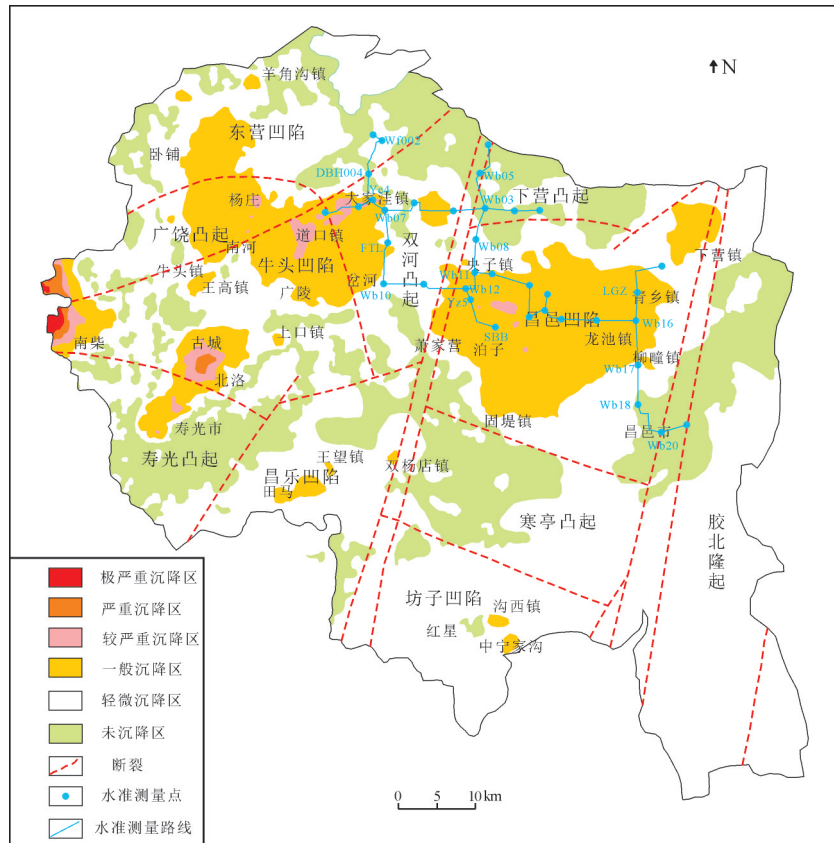


图6 多年平均地面沉降评价分区
Fig.6 Evaluation division map of multi-year average land subsidence

柴西北、古城—北洛—寿光和田马东等小片沉降区处于冲洪积平原分布区(图7)。下三角洲平原和上三角洲平原地层沉积物主要为海相沉积,湖积浅平洼地地层沉积物主要为湖沼相沉积,相对研究区南部的冲洪积地层沉积物而言,这两类沉积物岩性以细颗粒为主,黏性土类含量高、厚度大。在地面荷载和地下水开采等外在影响因素影响下,黏性土类

地层压缩排水产生不可回弹性变形,造成区域性地面沉降的发生。

从典型地层剖面来看(图8),穿越央子—泊子—固堤—龙池—青乡沉降区的剖面A-A',南北向上在青乡镇北—柳疃镇地段明显与南部、北部地段形成差异性沉降。究其原因,可以发现地面沉降地段的砂质黏土层和黏质砂土层厚度明显高于柳疃南部和青乡镇北部,这为地面沉降的发生提供了内在条件。

4.3.3 地面沉降与地下水开采强度响应关系

长期过量开采地下水是诱发研究区地面沉降的主要因素。因农业灌溉、工业用水等工农业生产的影响,该区地下水处于持续开采状态,区域上已形成桓台—广饶—寿光—寒亭—昌邑地下淡水超采漏斗和滨海咸水超采漏斗(徐军祥等,2002),并在区内形成南柴—古城—北洛、侯镇南、昌邑等地下水降落漏斗中心(图7)。

南柴西北和古城—北洛—寿光地面沉降区,与南柴—古城—北洛地下水降落漏斗分布对应关系显著,尤其是严重至极严重等级沉降区的范围与南柴地下水漏斗中心吻合性很好,这说明地下淡水的开采是造成该区地面沉降发育的主要原因。央子—泊子—固堤—龙池—青乡沉降区、大家洼—杨庄—南河—广陵—岔河沉降区分布区域与咸水超采漏斗范围一致,说明研究区北部地面沉降主要受地下咸(卤)水开采影响;这与前人得出的“潍坊北部区域地面沉降产生是因地下水开采引起的地层固

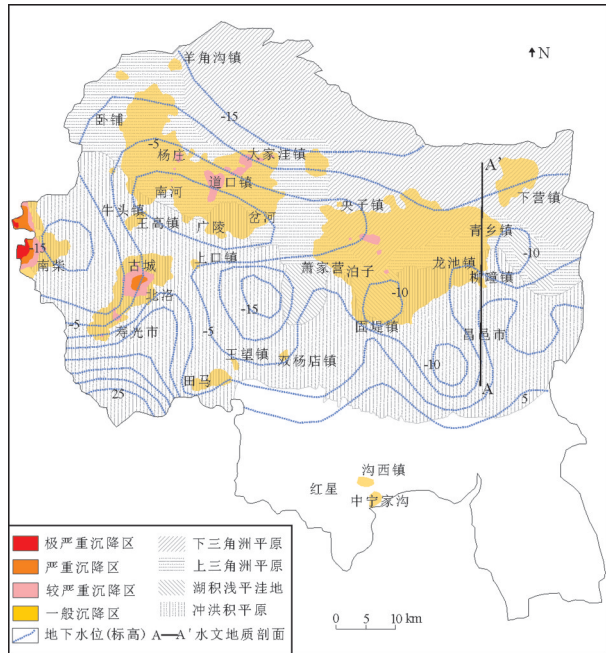


图7 地层沉积相与地下水位
Fig.7 Sedimentary facies and groundwater level map

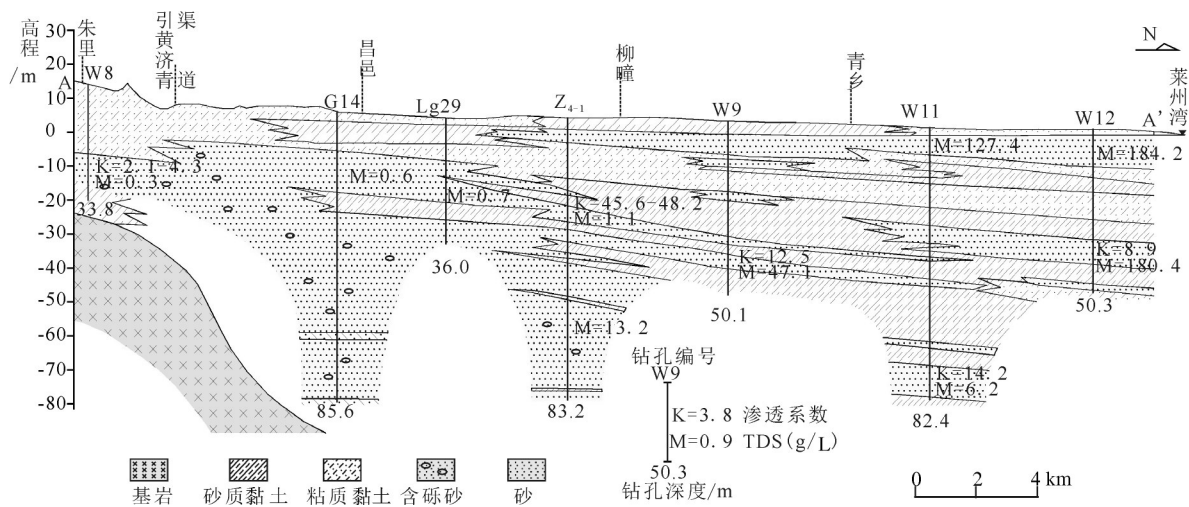


图8 A-A'水文地质剖面
Fig.8 Hydrogeological profile of A-A'

结所致”的结论相符(李洪春,2015)。

总体而言,研究区地面沉降发育特征与地下水开采强度具有明显的响应关系,尤其是对严重至极严重沉降区分布影响极为明显。

4.3.4 地面沉降与地面荷载响应关系

大规模的工程建设引起的地面荷载在一定程度上加剧了局部地段地面沉降的发育。近年来,随着潍坊滨海经济技术开发区和昌邑滨海(下营)经济开发区规划逐步落地,以大家洼镇、央子镇和下营镇为中心的区域开始大规模建设,虽然大型厂区和楼房等建筑物的地基多置于持力层较大的地层之上,但由水准监测数据显示建筑物覆盖区和非覆盖区的差异性沉降在高层建筑分布的局部地段也较为明显,多以点状和小片状分布。

综上所述,研究区地下水开采是区域地面沉降发生和发展的最主要控制因素,区域构造和地层结构是地面沉降发育的地质背景影响因素,地面荷载强度对点状不均匀沉降存在一定影响。

5 不同监测方法的对比探讨

为了验证本次 InSAR 监测地面沉降变化的可靠程度,将2014年内的水准测量数据与之进行对比(图6)。需要说明的是,本次埋设的部分水准标石稳定时限未完全经过一个雨季,会因标石自身沉降对部分水准测量结果产生一定误差,但这并不影响不同沉降区之间的差异性变化趋势分析。

本次选取南北向穿越轻微沉降区和一般沉降区的3条水准剖面进行对比分析。其中,剖面一中点 Wb20、Wb18 位于未沉降区,点 Wb17 位于轻微沉降区,点 Wb16、LGZ 位于一般沉降区,由南向北地面沉降总体呈现加剧的特征,这与水准剖面测量结果十分吻合(图9);剖面二中点 SBB、Yz5 和 Wb12 位于一般沉降区,点 Wb11、Wb08 位于轻微沉降区,点 Wb03、Wb05 位于未沉降区,由南向北地面沉降总体显示变缓的规律,这与水准剖面测量结果一致,仅点 Wb11 出现异常(图10);剖面三中点 Wb10、FTL 和 Wf002 位于轻微沉降区,点 Wb07、Yc4 位于一般沉降区,点 DBH004 位于未沉降区,由南向北地面沉降呈现轻-重-轻的变化特征,这与水准剖面测量结果相符(图11)。

两种方法的对比分析说明,本次评价的地面沉

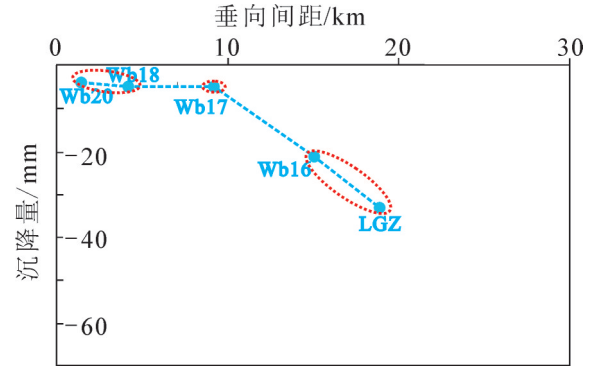


图9 剖面一沿程地面沉降量变化

Fig.9 Changes of ground subsidence along No. 1 profile

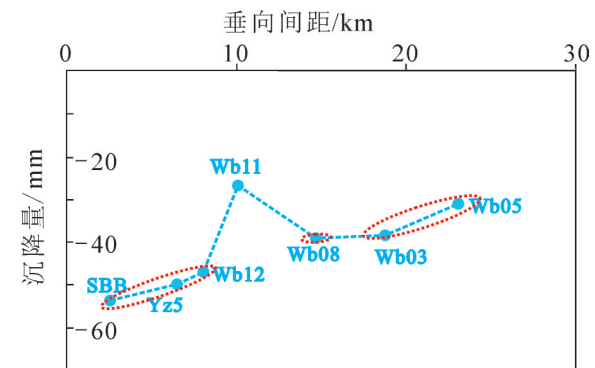


图10 剖面二沿程地面沉降量变化

Fig.10 Changes of ground subsidence along No. 2 profile

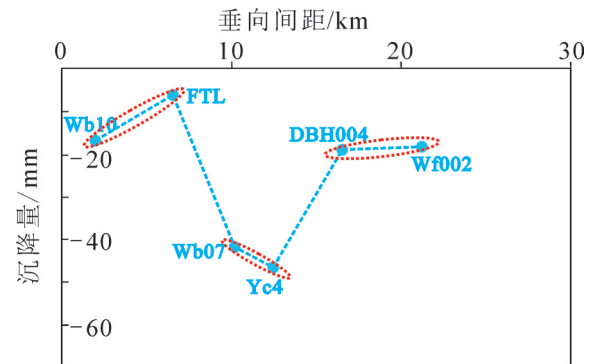


图11 剖面三沿程地面沉降量变化

Fig.11 Changes of ground subsidence along No. 3 profile

降分区能很好地指示研究区地面沉降发育特征,评价结果具有较高的可靠性和合理性。

6 结论与建议

(1)研究区存在较为明显的地面沉降现象,主

要分布在中北部和西南部地区。从沉降等级来看,严重和极严重沉降区占比0.34%,较严重沉降区占比0.86%,轻微和一般沉降区占比为74.64%,以轻微和一般沉降等级为主;地面沉降中心位于裴家岭、兴源西路北段、道口镇等16处地段,最大沉降速率高达168 mm/a;地面沉降近年来呈现加剧趋势,其中较严重至极严重沉降区面积增加4.52%,一般沉降区增加8.34%。

(2)该区地面沉降受区域构造影响平面分布呈现一定规律性。沉降主要分布在第四纪沉积凹陷和断裂交叉区域,受安丘—莒县、沂水—汤头、郯都—葛沟、古城—潍河口、柳疃等主要断裂构造控制较为明显;在广饶凸起、双河凸起等隆起区部分地段,地面沉降也比较发育,主要是因大量开采地下水所致。

(3)地层结构(岩性、沉积相)为该区地面沉降发育和加剧提供了地质背景条件。平面上,沉降速率高于10 mm/a的沉降区主要分布在岩性以细颗粒为主的三角洲平原和湖积浅平洼地区域内;垂向上,较厚层黏性土类分布地段地面沉降明显比砂性土类分布地段更为发育。

(4)地下水开采是造成该区区域地面沉降的主要因素,地面沉降的发育程度与地下水开采格局关系显著;地面荷载在一定程度上加剧了经济开发区等局部地段不均匀沉降程度。

(5)为防止地面沉降持续发展,建议对该区地下水实行分散式开采格局管制,在黏性土类层厚较大以及主要地下水漏斗区,应禁采或限采地下水;城市规划建设时应充分考虑工程建设布局的合理性,根据地层结构规划建筑物分布和层高;在确定地面垫高和防潮堤顶面设防高度时,要充分考虑地面高程损失量。同时,应加强区域三维地质结构探测研究,建设地面沉降分层标,进一步揭示地面沉降机理,以有效指导该区地面沉降防控。

致谢:感谢中国国土资源航空物探遥感中心葛大庆博士对雷达卫星影像处理和数据分析的支撑。

References

- Bawden G W, Thatcher W, Stein R S, Hudnut K W, Peltzer G. 2001. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects [J]. *Nature*, 412(6849):812–815.
- China Geological Survey. 2016. *Geological Environment Carrying Capacity Evaluation and Early Monitoring Warning Indicator System and Technical Method* [S]. (in Chinese).
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5):2202–2212.
- Fang Hao, He Qingcheng, Xu Bin, Wang Meihua, Li Xia. 2016. A study of risk assessment of the land subsidence in Cangzhou [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 43(4): 159–164(in Chinese with English abstract).
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2006. *Specifications for the First and Second Order Leveling* (GB/T 12897–2006) [S]. (in Chinese).
- Galloway D L, Hudnut K W, Ingebritsen S E, Phillips S P, Peltzer G, Rogez F, Rosen P A. 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California [J]. *Water Resources Research*, 34(10): 2573–2585.
- Ge Daqing, Wang Yan, Guo Xiaofang, Liu Shengwei, Fan Jinghui. 2007. Surface deformation monitoring with multi-baseline D-InSAR based on coherent point target [J]. *Journal of Remote Sensing*, 11(4):574–580 (in Chinese with English abstract).
- Guo Haipeng, Bai Jinbin, Zhang Youquan, Wang Liya, Shi Jusong, Li Wenpeng, Zhang Zuochen, Wang Yunlong, Zhu Juyan, Wang Haigang. 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 44(6):1115–1127(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongwei. 2017. *Investigation and Evaluation of Geological Environment in Laizhou Bay* [R]. Tianjin: Tianjin Center, China Geological Survey (in Chinese).
- Li Hongchun, Li Xiaolong, Zhang Yagang. 2015. On the main environmental engineering geological problems and countermeasures in the coastal area of northern Weifang [J]. *Value Engineering*, 34(23):97–99 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongwei, Ma Zhen, Chen Sheming, Guo Xu, Su Yongjun, Du Dong, Hu Yunzhuang. 2015. Saltwater intrusion measurement in Laizhou Bay southern area based on hydro-chemical and geophysical methods [J]. *Geoscience*, 29(2):337–343 (in Chinese with English abstract).
- Lei Kunchao, Luo Yong, Chen Beibei, Guo Gaoxuan, Zhou Yi. 2016. Distribution characteristics and influence factors of land subsidence in Beijing area [J]. *Geology in China*, 43(6): 2216–2225 (in Chinese with English abstract).
- Li Man, Ge Daqing, Zhang Ling, Liu Bin, Guo Xiaofang, Wang Yan. 2016. Characteristics and influencing factors of land subsidence in Caofeidian newly-developed area based on PSInSAR technique[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 28(4): 119–

- 126 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2015. Specificaiton of Risk Assessment for Geological Hazard(DZ/T 0286-2015)[S]. (in Chinese).
- Pacheco- martínez J, Hernandez- marín M, Burbey T J, González- Cervantes N, Ortíz- Lozano, J Á; Zerméño- De- Leon, M E, Solís- Pinto A. 2013. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México [J]. *Engineering Geology*, 164:172-186.
- Tomas R, Herrera G, Delgado J, Mallorquí J J, Mulas J. 2010. A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain) [J]. *Engineering Geology*, 111:19-30.
- Tomas R, Romero R, Mulas J. 2014. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: A review of practical issues through cases in Spain [J]. *Environmental Earth Science*, 71(1):163-181.
- Xiao Guoqiang. 2010. Environmental Geological Survey And Vulnerability Assessment of Key Areas in Bohai Region [R]. Tianjin: Tianjin Center, China Geological Survey (in Chinese).
- Xu Junxiang, Shi Baoyu, Chen Xiuming. 2002. Study on major ecological environment problems and its survey method [J]. *Shandong Geology*, 18(4): 95- 99 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinzhi, Huang Haijun, Liu Yanxia, Liu Yong, Ma Lijie. 2013. Monitoring and analysis of ground subsidence in the Modern Yellow River Delta Area based on PSInSAR technique [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 33(7):831- 836 (in Chinese with English abstract).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2006. 国家一、二等水准测量规范(GB/T 12897-2006)[S].
- 中华人民共和国国土资源部. 2015. 地质灾害危险性评估规范(DZ/T 0286-2015)[S].
- 中国地质调查局. 2016. 地质环境承载力评价与监测预警指标体系和技术方法[S].
- 房浩,何庆成,徐斌,汪美华,李霞. 2016. 沧州地区地面沉降灾害风险评价研究[J]. *水文地质工程地质*, 43(4): 159-164.
- 葛大庆,王艳,郭小方,刘圣伟,范景辉. 2007. 基于相干点目标的多基线D-InSAR技术与地表形变监测[J]. *遥感学报*, 11(4):574-580.
- 郭海朋,白晋斌,张有全,王丽亚,石菊松,李文鹏,张作辰,王云龙,朱菊艳,王海刚. 2017. 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*, 44(6): 1115-1127.
- 刘宏伟. 2017. 莱州湾地质环境调查评价[R]. 天津:中国地质调查局天津地质调查中心.
- 李洪春,李小龙,张亚刚. 2015. 浅析潍坊北部沿海区域主要环境工程地质问题及对策[J]. *价值工程*, 34(23): 97-99.
- 刘宏伟,马震,陈社明,郭旭,苏永军,杜东,胡云壮. 2015. 基于水化学与地球物理法的莱州湾南岸海(咸)水入侵勘查[J]. *现代地质*, 29(2):337-343.
- 雷坤超,罗勇,陈蓓蓓,郭高轩,周毅. 2016. 北京平原区地面沉降分布特征及影响因素[J]. *中国地质*, 43(6): 2216-2225.
- 李曼,葛大庆,张玲,刘斌,郭小芳,王艳. 2016. 基于PSInSAR技术的曹妃甸新区地面沉降发育特征及其影响因素分析[J]. *国土资源遥感*, 28(4):119-126.
- 肖国强. 2010. 环渤海地区重点地段环境地质调查及脆弱性评价[R]. 天津:中国地质调查局天津地质调查中心.
- 徐军祥,石宝玉,程秀明. 2002. 山东省主要生态环境地质问题与调查方法探讨[J]. *山东地质*, 18(4): 95-99.
- 张金芝,黄海军,刘艳霞,刘勇,马立杰. 2013. 基于PSInSAR技术的现代黄河三角洲地面沉降监测与分析[J]. *地理科学*, 33(7):831-836.

附中文参考文献

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2006. 国家一、二等水