DOI:10.19789/j.1004-9398.2018.04.013

通州区城市扩张对地面沉降的影响*

王 聪[1,2,3] 王彦兵[1,2,3] 周朝栋[1,2,3]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048; 2. 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; 3. 首都师范大学水资源安全北京实验室,北京 100048)

摘 要

地面沉降是一种不可补偿的永久性环境和资源损失. 在北京"市府东移"的战略背景下,通州城区快速扩张、基础设施加速建设、人口急剧增多,都会对通州沉降漏斗的演变造成新的压力. 本文基于 ENVISAT ASAR(2003—2010 年)和 RADASAT-2(2010—2016 年)两个时段的时间序列 SAR 影像,利用最新的永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)技术提取高精度的沉降数据,并结合地下水水位数据、土地利用数据,采用 GIS 空间分析方法,分析通州区地面沉降的时空演化特征及其成因. 结果表明: 1) 2003—2010 年,漏斗中心的最大年沉降速率为 88. 55 mm/a,2010—2016 年的最大年均沉降速率达到 127. 58 mm/a,其沉降呈不断加重的趋势,这两个阶段的区域最大累积沉降量达到 1 219. 45 mm. 2) 2016 年建设用地面积较 2003 年净增 202. 38 km^2,达到 433. 85 km^2,建设用地的主要转入来源为绿地. 建成区的持续扩张、大量的生态用地被侵占,致使通州城区地面沉降加速演变. 3) 城市人口增多带来用水量的增加,导致地下水开采量的增加. 四个水位监测点上的水位标高的均出现不同程度的下降且与沉降的趋势有很高的相关性.

关键词: 地面沉降,PS-InSAR,通州新城,城市扩张.

中图分类号: P642. 26

0 引 言

地面沉降是由于地表土层压缩而导致的区域性地面标高降低的一种环境地质现象,是一种不可补偿的永久性环境和资源损失[1]. 目前,国内外研究学者对区域地面沉降的研究,主要围绕地面沉降监测方法、时序演化特征、成因机理等方面展开[2-4]. 监测方法上,SAR 干涉测量(interferometric SAR, InSAR)是获取高精度地面形变的前沿技术,传统的 GPS 监测数据则用于补充长时间序列的常规监测数据. 多源数据相互补充并验证被用于研究区域地面沉降的空间分布特征、时间演化特征[5]. 地面沉降的成因机制复杂多样,随着城市的发展,人为因素在地面沉降中的作用日益凸显[6-7]. 张雯等[8]和宫辉力等[9]研究结果表明,地下水过量开采和城市化建设过程中导致的土地利用格局的改变已成为诱发区域性不均匀地面沉降的重要因素. 2003—2010 年,北京平原已经形成五大沉降区域: 东八里庄 - 大郊亭沉降中心、通州三间房沉降中心、朝阳区来广营沉降中心、平各庄和天竺沉降中心和昌平沙河 - 八仙庄沉降中心[10]. 近年来,在实施京津冀协同发展和北京"市府东移"战略的背景下,通州将成为首都功能加快重构进程中高端资源迅速集聚的重要区域[11]. 在高速的城市建设进程中,人口过度聚集于建成区,社会经济活动侵占生态空间,地下水开采需求增加,对通州城市副中心所处沉降漏斗的演变也将带来新一轮的影响[12].

综上所述,对通州城市副中心的地面沉降现状研究,已成为实现通州城市社会经济健康可持续发展的重要需求. 如何在巨大的城市快速发展压力和较为脆弱的生态条件下,有效地监测地面沉降,增强城市土地资源承载力,协调城市发展和土地利用之间的矛盾,已成为当前通州城市发展所面临的重要挑战. 本文以 ENVISAT ASAR(2003—2010)、RADASAT-2(2010—2016)数据为基础,利用最新的永久散射体合成孔径雷达干涉测量(permanent scatterer interferometric SAR, PS-InSAR)技术提取高

收稿日期: 2017-09-13

* 国家自然科学基金面上项目(41671417)和北京市教委科技计划一般项目(KM201610028013)资助.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

精度的沉降数据,结合水准监测数据、地下水水位数据、土地利用数据,采用 GIS 空间分析方法,分析通州区地面沉降的时空演化特征及其成因.

1　研究区域与方法

1.1　研究区域概况

本文研究区通州位于北京市东南部,与朝阳区、大兴区和顺义区接壤,辖 4 街道、11 乡镇. 2004 年北京城市总体规划提出了“两轴—两带—多中心”的空间结构和新城发展战略,通州成为北京城市扩张中一个重要的中心城区. 2015 年 7 月,北京市委全会正式公布“聚焦通州,加快市行政副中心的规划建设”. 此后,通州区作为北京市行政副中心进入高速发展阶段.

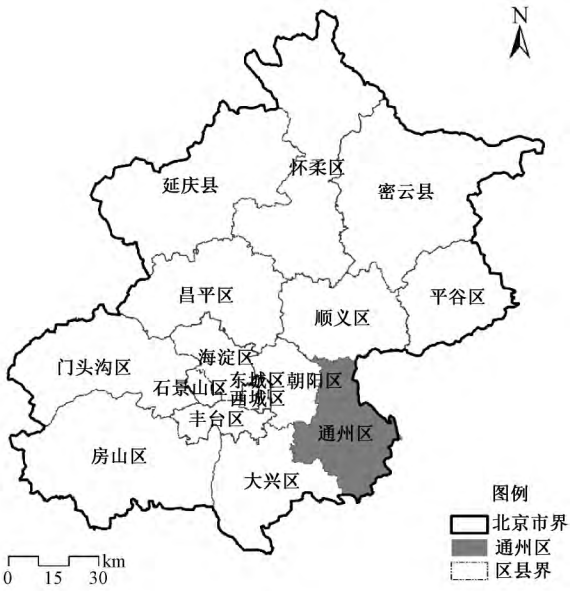


图 1　研究区域示意图

通州区位于沉降发育较为严重的北京平原,出露地层均为第四系. 由黏性土和砂层组成,黏性土是相对隔水层,砂层为含水层. 砂层较多,含水砂层间的黏性土较薄且延展不甚稳定. 通州区属大陆性季风气候区,年平均降水 620 mm 左右,集中在夏季七八月份.

1.2　研究数据来源及处理

1.2.1　PS-InSAR 方法及验证

本文研究的 SAR 数据包括两个阶段(表 1),第一阶段 2003—2010 年数据来自欧空局 ENVISAT ASAR 降轨数据共 49 景,影像的波长为 5.6 cm,VV 极化方式,空间分辨率为 30 m. 第二阶段 2010—2016 年的数据为 RADASAT-2 SAR 宽模式单式侧距影像,距离向和方位向像元大小分别为 11.83 m 和 5.21 m,共计 43 景. 沉降监测结果验证数据为北京地质水文队工程队的水准测量结果(表 2). 地下水位监测数据来源于《中国地质环境监测地下水位年鉴》.

表 1　研究区 SAR 数据类型

ENVISAT ASAR		RADASAT-2	
期数	获取时段	期数	获取时段
3	2003-06-18—2003-12-10	2	2010-11-22—2010-12-16
9	2004-01-14—2004-12-29	9	2011-06-02—2011-12-11
2	2005-03-09—2005-12-14	7	2012-01-28—2012-11-11
2	2006-08-16—2006-10-25	6	2013-01-22—2013-12-24
9	2007-01-03—2007-12-19	7	2014-02-10—2014-12-19
9	2008-01-23—2008-12-03	9	2015-02-05—2015-12-14
8	2009-01-07—2009-12-23	3	2016-01-31—2016-05-30
7	2010-01-27—2010-08-25		

表 2　研究区沉降监测结果验证数据

站点	坐标		年形变高差/mm				
	经度	纬度	2005—2006	2006—2007	2007—2008	2008—2009	2009—2010
BJ160	116.64°	39.92°	-56.92	-84.26	-90.00	-89.32	-90.70
BJ176	116.68°	39.93°	-27.42	-31.99	-52.39	-63.78	-67.60
BJ008	116.69°	39.99°	-8.67	-16.57	-7.99	-22.59	-14.70

Envisat ASAR 与 RADASAT-2 数据均采用 PS-InSAR 方法进行处理,永久散射体干涉测量技术能有效降低时间空间去相干影响,以及减弱大气延迟引起的误差组分. 首先,获取主辅影像干涉对,采用外部 SRTM 90 m 分辨率 DEM 去除地形相位,生成差分干涉图. 然后,根据相干性和振幅离差指数初步选取永久散射体(permanent scatterer, PS)点,并评估误差组分的空间相关性,筛选高质量 PS 点. 最后,根据大气相位、地形残差相位,轨道和噪声的时间空间特征,采用时空滤波方法逐步分离,得到最终的形变信息,并采用水准监测的沉降值进行验证. 采用统计分析和 GIS 空间分析方法,分析地面沉降空间布局和时间演化特征.

通过对比 2005—2013 年期间 BJ160、BJ176、BJ008 三个监测站水准测量地面高差和 PS-InSAR 监测结果(图 2),实线表示水准测量结果,虚线表示

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

PS-InSAR 监测结果. 可以看出两者走势基本一致，在该时间段内沉降量稳定在 5 ~ 105 mm/a. 对比 PS-InSAR 监测的年沉降量结果和水准监测年形变高差结果，其误差值在 7 mm 范围内.

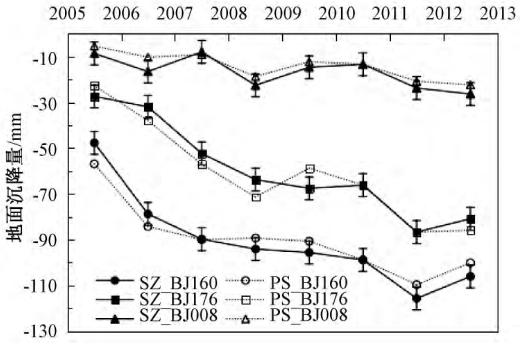


图 2 水准测量与 PSInSAR 监测结果对比

1.2.2 土地利用数据处理及验证

通州土地利用变化数据来自地理空间数据云 6 期Landsat 7-TM 影像数据分类结果(表 3，Landsat-7 的 TM 影像包含 7 个波段，融合后其分辨率为 30 m，Landsat-7 的 TM 影像选择 5、4、3 波段分别赋予红、绿、蓝来合成假彩色图像，合成后的图像水体和植被得到增强，城区密度大的地方为深紫色，密度较小的地方显浅紫色，植被与水体都是接近真实的假彩色，地物差异明显，易于区分. 分类方法为非监督分类(ISODATA)，同时期的可见光 google 影像用于土地利用分类结果验证.

表 3 研究区 Landsat 数据类型

时间	云量/%	中心经度	中心纬度
2003-07-28	0.01	116.616 4°	40.332 7°
2005-09-03	0.13	116.590 7°	40.352 8°
2007-09-09	0.03	116.556 2°	40.365 2°
2009-08-13	0.00	116.703 2°	40.365 2°
2011-09-20	0.00	116.688 0°	40.330 9°
2016-10-03	0.07	116.684 0°	40.328 8°

利用 ENVI 软件将获得的遥感影像数据进行波段融合、几何纠正、大气校正、图像配准以及裁剪等预处理，考虑到研究区域的土地利用实际情况，将土地利用类型划分为城市建设用地(包括城市公共设施、居民点、交通道路)、绿地(包括林地、耕地和草地)、水域(河流、水库) 3 大类. 并采用可见光影像对分类结果进行精度验证，得到的各年份用户精度均大于 90%(表 4). 以 TM 影像提取通州区土地利用情况，采用空间分析方法研究城市化建设与地面沉降的相关性.

表 4 TM 数据土地利用提取精度

年份	用户精度/%	Kappa 系数
2003	90.884 0	0.889 6
2005	90.215 4	0.866 8
2007	91.115 9	0.874 5
2009	92.458 3	0.874 5
2011	91.236 5	0.857 5
2016	92.653 2	0.881 5

2 通州地面沉降时空演化特征与成因分析

2.1 通州地面沉降时序演化特征

利用 ArcGIS 空间统计克里金插值及栅格重分类的方法对 PS 点集的沉降信息进行分析，获取通州区 2003—2010 年的年均沉降速率和 2010—2016 年的年均沉降速率对比图(图 3). 前者从整体上反映了通州区第一阶段的地面沉降的幅度和趋势，可以看出 2003—2010 年的七年间通州区的沉降漏斗已经形成，最大沉降漏斗位于 P4-潞河中学操场南、P5-八里桥村东 400 m 小树林处，周围有 P1、P2、P3、P6、P7 为中心的 5 个较小沉降中心，漏斗中心的最大年沉降速率为 88.55 mm/a. 后者反映了通州区在 2010—2016 年的六年时间里其沉降漏斗呈扩张趋势，且第二阶段的最大年均沉降速率达到 127.58 mm/a. 说明通州城区的沉降在不断加重，速率在增加，漏斗面积在增大.

利用栅格计算器将两个阶段的累积沉降叠加求和，得到 2003—2016 年 13 年间的时序沉降演化结果图(图 4). 图中反映出通州沉降漏斗中心的演变过程，可以看出其沉降演变分布不均，沉降区域主要集中在通州中心城区的东部和北部. 两个阶段的区域最大累积沉降量达到 1 219.45 mm，其中第一阶段和第二阶段的区域最大累积沉降量分别为 656.70 mm 和 715.97 mm. 对比两个阶段的年均沉降速率和最大累积沉降，都可以看出第二阶段的沉降较为严重，说明通州城区在过去的两个时段，其沉降呈不断加重的趋势.

在地面沉降较为严重的范围区域内选取 7 个典型 PS 点，通州东部和西部非沉降漏斗区各一个点，结合 InSAR 监测结果，分析地面沉降时序演化特征. 根据时间序列沉降监测信息，统计各典型区内地面沉降累积沉降量，如图 5 所示. 2003—2016 年间，位于通州中心城区及其附近的 7 个典型 PS 点的沉降量都呈平稳增加趋势，且沉降速率在逐年增大，位于沉降漏斗中心的 P4 和 P5 两点的累积沉降量

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

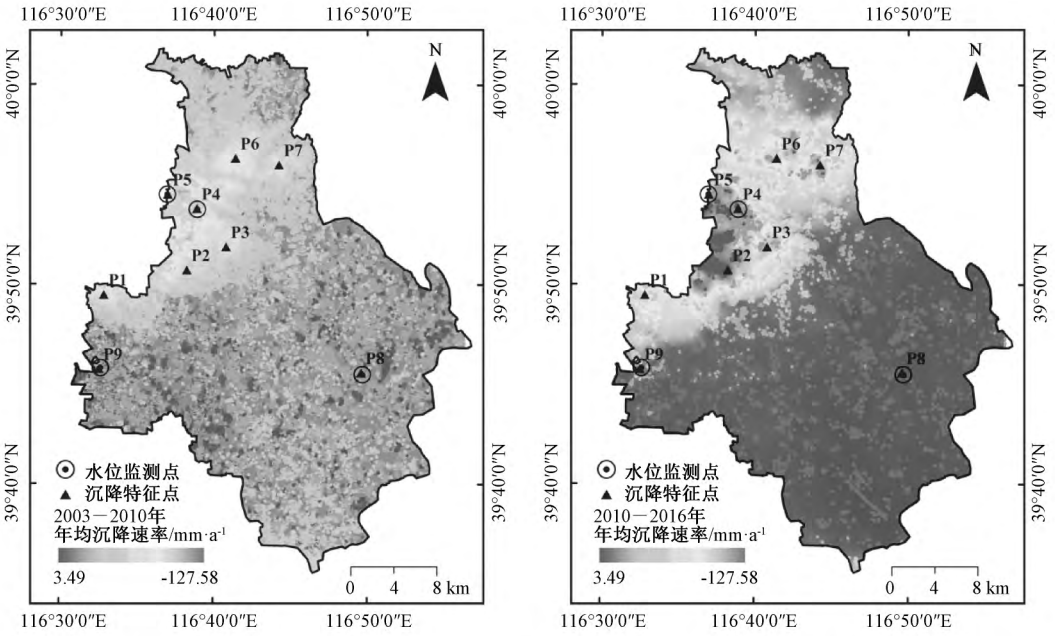


图 3　通州 2003—2010 年和 2010—2016 年年均沉降速率

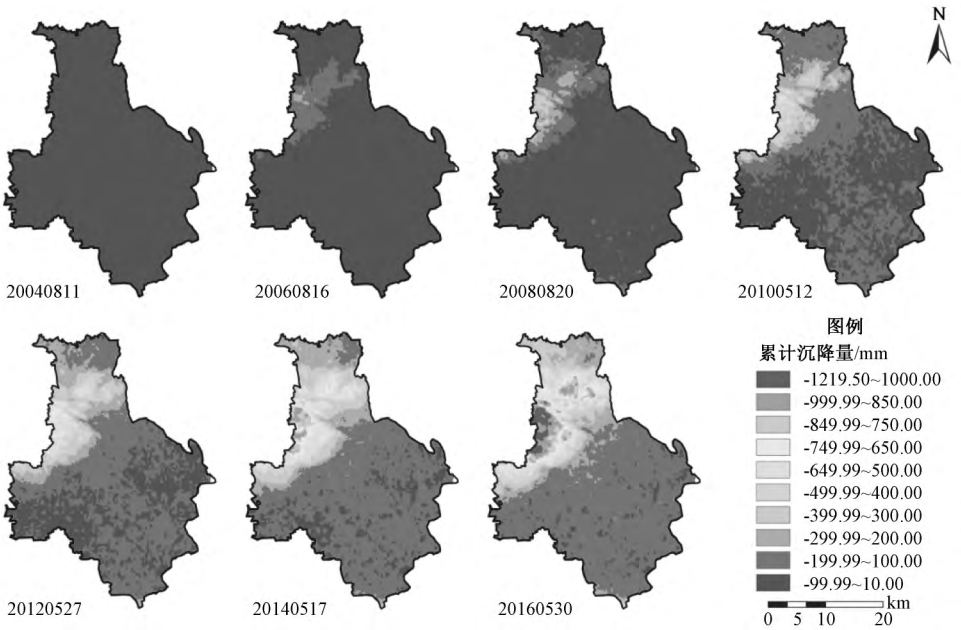


图 4　通州 2004—2016 年地面沉降时序演化

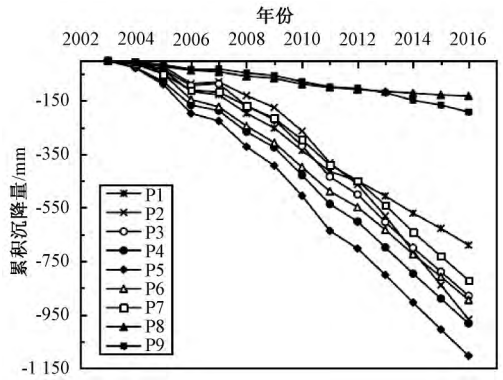


图 5　典型 PS 点的累积沉降时序变化

分别达到 1 094. 79 mm 和 1 054. 99 mm. 位于非沉降漏斗区的 P8 和 P9 两点亦呈现缓慢沉降趋势.

2. 2　地面沉降与地下水变化分析

对比分析 P4-潞河中学操场南、P5-八里桥村东 400 m 小树林、P8-马头粮库院内、P9-马驹桥水管站院内四个水位监测点,及其相应位置上的 PS-InSAR 沉降监测信息. 从图 6 中可以发现四个水位监测点上的水位标高的变化与沉降的趋势有很高的相关性. 以位于沉降中心的水位点 P4 为例,该区域的地下水开采层主要位于 48 ~ 95 m 的地面沉降主要贡

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

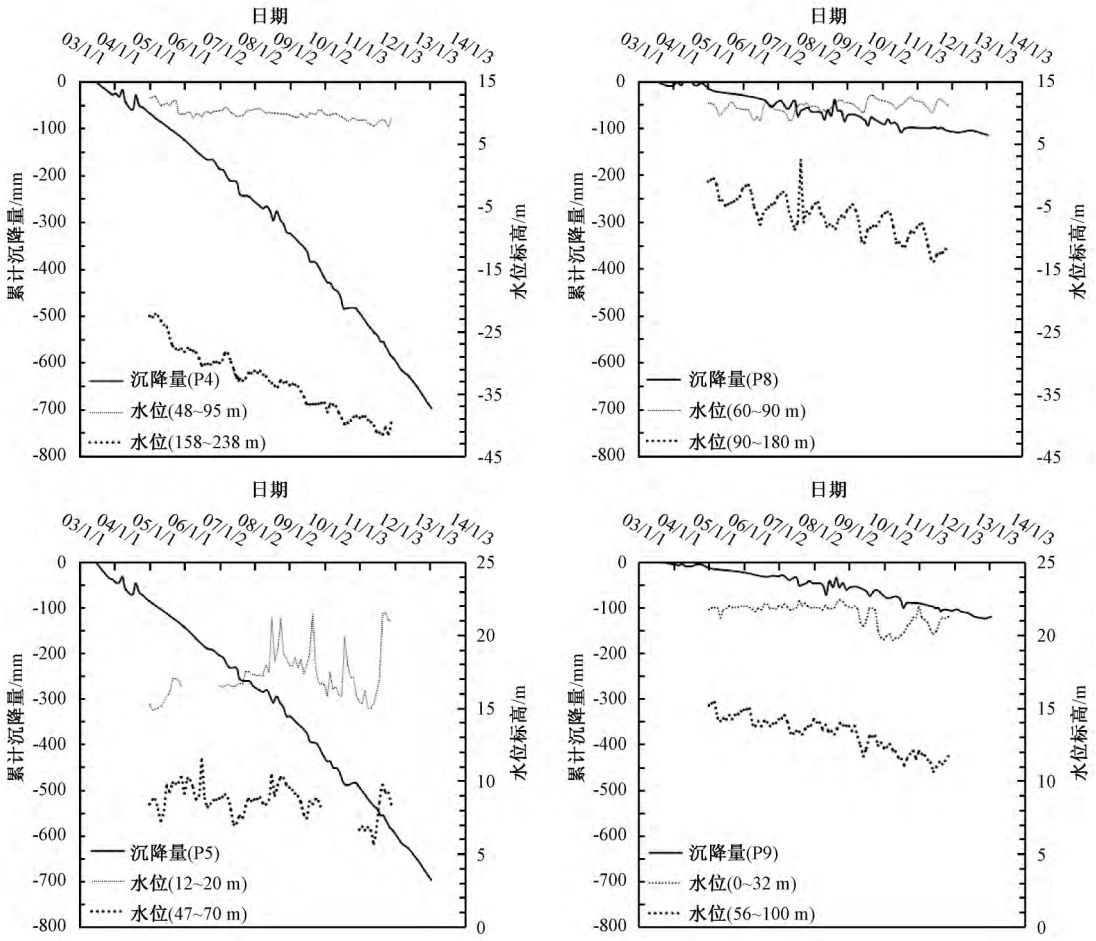


图 6 地下水位标高与累计沉降对比

献层或 158 ~ 238 m 的次要贡献层. 与 2003 年相比，通州区地下水的开采水位整体向更深层发展，地下水的水位标高逐年下降. 随着通州城区大规模的城市化建设，人口的迅速增长和不断增长的行业，使得用水需求量逐年增大，地下水开采量随之增大，从而导致地下水位下降和区域性地面沉降.

2.3 建设用地扩张对地面沉降的影响

选取 2003—2016 年间覆盖研究区的 6 景 TM 影像，提取土地利用类型(图 7). 自 2003 年以来，通州建成区面积呈现持续增长趋势，2003—2009 年扩展方向主要由中心城区向北及东延伸. 2009 年建设用地面积为 366.07 km^2. 2009 年以后，通州主城区东部及北部建设用地达到饱和，开始往南部郊区发展，到 2016 年建设用地面积较 2003 年净增 202.38 km^2，达到 433.85 km^2，2003 年通州的绿地面积为 664.29 km^2，到 2016 年，绿地总面积减少了 202.02 km^2，仅为 2003 年绿地面积的 2/3. 在 2003—2009 年间建设用地以平均 22.43 km^2/a 的速度扩增的同时，绿地面积在以 20.33 km^2/a 的速度递减，在 2009—2016 年间，建设用地以平均 9.68 km^2/a 的速率扩增，绿地以平均 8.58 km^2/a 的速率递减，建设用地的主要转入来源为绿地(图 8).

3 结论与讨论

基于多元 SAR 数据，采用 PS-InSAR 方法，分别获取通州区 2003—2010 年和 2010—2016 年两个时段的年均沉降速率和时序沉降演化信息. 结合水位数据与用地信息分析通州城区的快速建设与发展对通州沉降区的影响，发现地面沉降与城市建设的空间－时间的相关是由多方面因素引起的.

1) 2003—2010 年，漏斗中心的最大年沉降速率为 88.55 mm/a，2010—2016 年的最大年均沉降速率达到 127.58 mm/a. 两个阶段的最大累积沉降量达到 1 219.45 mm，其中第一阶段和第二阶段的最大累积沉降量分别为 656.70 mm 和 715.97 mm. 对比两个阶段的年均沉降速率和最大累积沉降，都

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

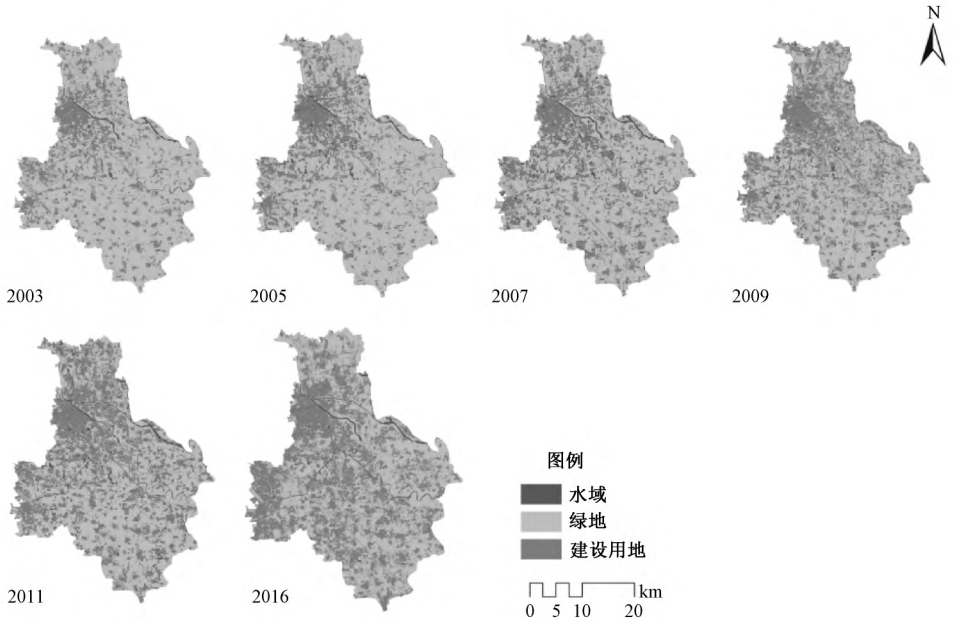


图 7　通州 2003—2016 年土地利用变化

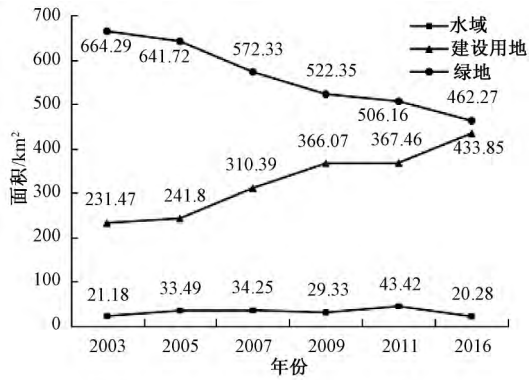


图 8　通州 2003—2016 年用地面积变化

可以看出第二阶段的沉降较为严重，说明通州城区在过去的两个时段，其沉降呈不断加重的趋势.

2) 大量侵占生态用地扩张建成区已成为致使通州城区地面沉降加速演变的一个重要因素. 采用 TM 影像，提取土地利用类型，分析近 13 年来建筑面积的增长和同时期的沉降速率的变化趋势，结果表明，随着城市建设的快速发展，通州新城的沉降趋势明显，2016 年建设用地面积较 2003 年净增 202.38 km^2，达到 433.85 km^2，建设用地的主要转入来源为绿地，其建设用地扩展方向主要由中心城区向北及东延伸域这与通州沉降漏斗的发展趋势一致.

3) 结合水位监测点上的水位标高的变化与沉降的演变趋势发现，二者之间具有很高的相关性. 进一步分析结果表明，通州城区大规模的城市化建设，人口的迅速增长和不断增长的行业，使得用水需求量逐年增大，地下水开采量随之增大，从而导致地下水位下降和区域性地面沉降.

在“北京市府东移”的指导下，通州城区的城市建设发展迅速. 城市化进程中导致地面沉降的原因复杂多样，大量开采地下水是造成地面沉降的主要因素. 随着城市的大规模建设，城市生态用地被侵占，大规模的建设施工对地面沉降的作用凸显. 选择通州新城区的建设用地变化信息及同时期的地面沉降监测资料进行对比分析发现，随着以工业和住宅等为主要目的建设用地的迅猛增长，地面沉降的速度也在不断加快. 证明地面沉降与城市建设存在必然联系. 究其原因，建成区的面积增大最明显的后果是引起水循环的变化，农田绿地的面积逐渐减小，防渗材料，如混凝土，塑料或沥青逐渐取代天然表面. 建成区渗透系数较小，使降雨对地下水有效补给量较少，间接加速了地面沉降的演变和发展.

因此，有效利用地下水，保持农田、绿地总面积(城市透水面面积)，以及对于工程建设中的多因素引起的地面沉降给予足够重视，这对于通州新城地面沉降的防治需求，合理制定北京城市副中心未来的建设规划，提高社会经济可持续发展能力，有重要的参考价值.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1] 申太祥. 论城市建设对地面沉降的影响[J]. 科技资讯,2010(1):76-78.

[2] 王琴,陈蜜,刘书军. 应用相干点目标干涉测量分析方法监测北京市地面沉降[J]. 首都师范大学学报:自然科学版,2016,37(6):75-79.

[3] 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.

[4] 杨艳,贾三满,罗勇,等. 北京地面沉降工作分析及展望[J]. 城市地质,2012,7(2): 9-13.

[5] 付梦娣,肖能文,赵志平,等. 北京城市化进程对生态系统服务的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(5):235-239.

[6] 颉晋荣,宫辉力,陈蓓蓓,等. 基于马尔科夫和信息熵的北京平原地面沉降空间结构演化分析[J]. 首都师范大学学报:自然科学版,2015,36(6):87-91.

[7] 田春艳,彭国荣,王蕊. 区域性地面沉降对桥梁变位监测的影响分析[J]. 市政技术,2014,32(4):107-110.

[8] 张雯,宫辉力,陈蓓蓓,等. 北京典型区地面沉降演化特征与成因分析[J]. 地球信息科学学报,2015,17(8):909-916.

[9] 宫辉力,李小娟,潘云,等. 京津冀地下水消耗与区域地面沉降演化规律[J]. 中国科学基金,2017(1):72-77.

[10] 周朝栋,宫辉力,张有全,等. 基于 PS-InSAR 和 GIS 的北京平原区建筑荷载对地面沉降的影响[J]. 地球信息科学学报,2016,18(11):1551-1562.

[11] 邓羽,贾宁,刘毅. 北京"市府东移"背景下通州区城市扩展模拟与管控启示[J]. 城市发展研究,2016,23(10):27-35.

[12] 谢高地,张彪,鲁春霞,等. 北京城市扩张的资源环境效应[J]. 资源科学,2015,37(6):1108-1114.

The Influence of Urban Expansion of Tongzhou on Land Subsidence

Wang Cong[1,2,3] Wang Yanbing[1,2,3] Zhou Chaodong[1,2,3]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048; 2. Base of the Key State Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Simulation, Capital Normal University, Beijing 100048; 3. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract

Land subsidence is a loss of environment and resources which is unable to be compensated. Under the strategic background of new city subsidiary-center of Beijing, the center has expanded rapidly, the building speed of the infrastructure accelerates and the number of population in this area increases sharply, all of these have posed much pressure on the evolution of the settlement funnel. This paper employs Persistent Scatterers InSAR to detect and characterize spatiotemporal changes of ground subsidence, SAR datasets used for ground subsidence monitoring over the Tongzhou region including ASAR images acquired from 2003 to 2010 and RADARSAT-2 images acquired from 2010 to 2016. The study also combines groundwater level data, land use data, and GIS spatial analysis methods to analyze spatial-temporal variations of the evolution and the causes of the land subsidence. Major findings are summarized as follows: 1) From 2003 to 2010, the maximum annual settlement rate of funnel center was 88.55 mm/a and achieved 127.58 mm/a in next six years. In the past two periods, the maximum cumulative subsidence reached 1 219.45 mm, and the figure of subsidence of Tongzhou urban area increased continuously. 2) Compared with 2003, the area of construction land in 2016 increased to 433.85 km^2, gained 202.38 km^2 and the main source of construction land was green space. The continuous expansion of the built-up area and the occupation of a large number ecological land led to the accelerated evolution of ground subsidence in Tongzhou 3) The increase of urban population brought the increase of water consumption, which eventually led to the increase of groundwater exploitation. The water level elevation at the four water level monitoring points all decreased to varying degrees and had a high correlation with the trend of settlement.

Key words: land subsidence, PS-InSAR, Tongzhou new town, urban expansion.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net