



武汉市中心城区地表形变与洪涝灾害防治新策略

谢 萍¹ 张双喜^{2,3} 周 吕⁴ 李庆隆² 肖家豪² 蔡剑锋²

1 武汉中心气象台,湖北 武汉,430074

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

3 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

4 桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林,541004

摘 要:武汉市2013年和2016年的城市洪涝暴露了城市基础设施应对洪涝灾害的严重不足。水面锐减导致传统的抽排模式受到越来越大的挑战。如果利用土壤的水容能力,既可以资源化雨洪利用,又能改善土壤圈生态,将是一种新的城市防洪方向,为此,查明城市地表形变规律和土壤非饱和信息至关重要。基于2015-04—2016-04 InSAR (interferometric synthetic aperture radar)数据和110个基准点信息,获得武汉市中心城区的地面沉降数据,与长江水面进行对比分析,研究水面变化与地表形变的相关性。研究发现,武汉市中心城区的地面沉降达到18 mm/a,主要是土壤水的物理化学膨胀作用,指示了土壤的不饱和状态,其潜在的防洪能力远大于其他方法。另外,城市地面前上升呈现带状分布,也指示了雨水的径流方向。

关键词:城市洪涝;InSAR;地表形变;地面抬升;地面沉降

中图分类号:P237

文献标志码:A

武汉市素有“百湖之市”之称,水域面积占比达25%,但城市内涝一直是威胁武汉市的自然灾害之一。城市土壤圈有极强的水容特征,是容易被忽视的潜在储水资源。如何发挥水容特征,甚至利用雨洪的水资源特性,减少洪涝灾害影响,是武汉市城市可持续发展的重大课题。本研究的科学目标是通过调查城市的地表形变,探索新的防洪方法。

地面沉降是目前全球大都市的常见现象,城市地表形变通常只关注城市的地面沉降。地面沉降存在自然与人为的作用。其中,自然作用主要包括区域地块下沉、地震、滑坡、垮塌、气象等自然因素^[1-3];人为作用主要包括地下水过量抽排、地下开挖、填埋区压实、地面载荷增加等因素^[4-5]。在这两类因素的作用下,城市土壤圈的环境质量下降,承载自然灾害的能力减弱。监测城市地表形变可以为预防突发的地质灾害、控制人为因素的影响、保持城市土壤圈环境提供科学证据。

高精度的合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术结合地面观测技术为武汉市地表形变调查提供了数据基础^[6-7], Sentinel-1卫星提供了宽幅高分辨率的干涉SAR影像,便于量化分析城市地表形变的时空特征。近年来,InSAR技术越来越多地用于城市地表的沉降监测与环境治理^[8-11]。在InSAR的光谱图上,不仅可以提炼地表的沉降信息,而且也可以分离城市地表的抬升信息。本文基于武汉市的地表抬升形变特征,针对城市内涝问题,提出因势利导的解决方案。

1 武汉市区域地质背景

武汉市地处东秦岭-大别山造山带与下扬子板块的交接处,是印支碰撞造山运动的产物,秦岭-桐柏-大别山造山带的南缘为勉略缝合带^[12-14],如图1所示,缝合带两边板块的相对运动控制着武汉市区域的沉积作用、岩浆活动、构造运动以

收稿日期:2020-08-07

项目资助:国家自然科学基金(42074176,41874169);武汉市示范项目(WHDYS-2018-006)。

第一作者:谢萍,高级工程师,主要从事应用气象研究和决策气象服务工作。pxie_hbqx@126.com

通讯作者:张双喜,博士,教授。shxzhzhang@sgg.whu.edu.cn

及地貌演化。

武汉市的地貌形态可归纳为3大类型,即剥蚀残丘、剥蚀堆积垆岗、堆积平原,如图1所示。其中,剥蚀残丘面积占比18.1%;堆积垆岗面积占比42.6%;平原面积占比39.3%^[7]。残丘的岩性主要由志留系砂页岩、泥盆系石英砂岩、二叠系

硅质岩等组成,高程大于100 m,相对高差为40~60 m,呈近南北向的冲沟发育。发育较广泛的湖泊堆积平原高程小于100 m,相对高差小于20 m,主要由第四系下更新统砂、砂砾石、粉质粘土、淤泥质粉质粘土等组成,呈半固结状,基底由白垩-下第三系泥质粉砂岩等组成。

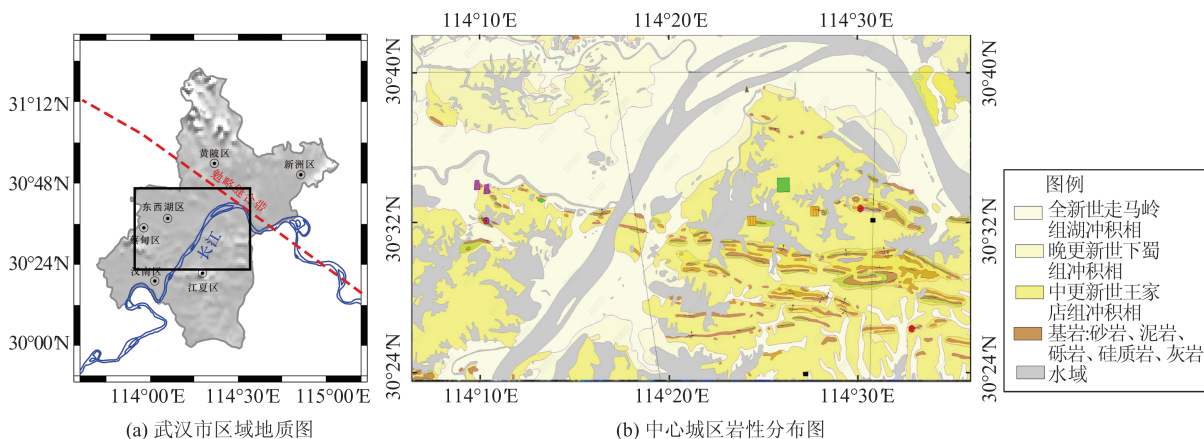


图1 武汉市区域地质图与中心城区岩性分布图

Fig.1 Regional Geological Map and Lithologic Distribution Map of Central District in Wuhan

残丘、垆岗的走向为近东西向,反映了下扬子北缘受南北向挤压的构造背景。喜马拉雅运动以来,西高东低的地貌形成了长江河道,与汉江交汇于地势低洼的中心城区,低洼地的岩性分布以堆积平原为主。在长江和汉水的支流两岸形成条带状或弯月状不对称的河流堆积平原,沉积巨厚的第四系冲积粘性土、粉土、砂及砾卵石层。如图1所示,残丘和垆岗为区域基岩隆起部分,常见岩石有砂岩、泥岩、砾岩、硅质岩、灰岩等。

受全新世中晚期云梦泽地区地壳隆起的影响^[15],武汉市域内形成众多形状各异、汉道狭长钩串、自然裁弯的残积湖、构造湖、冲积湖等^[16-17],如图2所示。市辖区现有166个湖泊,277座水库,水域面积占比25%^[7]。

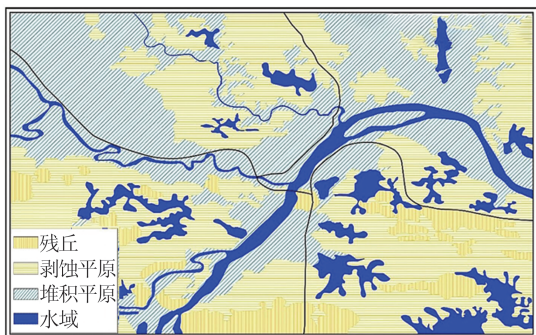


图2 武汉市中心城区地貌略图

Fig.2 Geomorphological Sketch of Wuhan Central District

随着武汉市进入快速发展期,区内湖泊数量锐减,水面面积和库容同步缩小。如城市中心的沙湖面积从1987年的8.3 km²减少到2016年的2.3 km²,湖泊萎缩72.3%。据1987—2016年的资料统计^[7]表明,南湖面积从1987年的15.4 km²减少到2016年的7.1 km²,湖泊萎缩53.9%。当汛期暴雨过程频发时,往往会爆发城市内涝。

水面面积的减少造成武汉市抗洪灾能力永久性退化。城市水体的锐减削弱了对极端气候的调节功能。然而,武汉市特有的地貌与沉积环境是可以利用的潜在资源,巨厚的堆积平原是隐伏的“海绵体”,但这种资源一直被忽视。本文利用InSAR技术监测城市地表的形变量,揭示“海绵体”的动态特征。

2 武汉市洪涝事件后的地表形变监测

2.1 地表形变

InSAR的工作原理是基于对地表形变影像的干涉^[18],公式如下:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + \alpha + t + N \quad (1)$$

式中, $\Delta\varphi$ 是两次观测的相位差; ΔR 是雷达目标的测距; α 为大气效应; t 为地形畸变产生的视角差; λ 为波长; N 为测量噪声。通过去噪、地形和大气校正后,可以提取地表的形变信息。

基于 Sentinel-1A 卫星 TOPS (terrain obser-

vation with progressive scans)模式获得武汉市中心城区(114°6.42'E~114°36'E, 30°23.52'N~30°42'N)在2015-04-11—2016-04-29期间的多期宽幅叠加影像^[18],提取武汉市近1年的形变信息。利用城市110个测量控制点高程信息^[18],控制精度达到6 mm/a。城市的主要形变为沉降,也有明显的抬升过程。如图3所示,1年的InSAR影像能够观测到武汉市中心城区的地表形变。平均10 mm/a的形变量级与全球许多超大城市的观测结果相似^[19-20]。由于城市人口密度增加、人为开发利用和地下水过度开采与补给不足导致地面出现下沉。

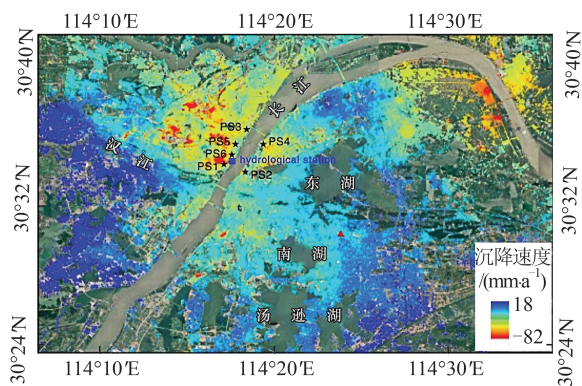


图3 武汉市中心城区地表形变InSAR观测影像

Fig.3 InSAR Observation Image of Surface Deformation in Wuhan Central District

本文就武汉市地面抬升现象,研究雨水与地面升降的相关性,揭示城市洪涝导致地面抬升以及对近地表环境的影响。所有基点均布置于武汉市区的各类地貌基岩体上,保障了基站的区域代表性和高程测量精度^[21-22],通过110个城市地面基点观测点数据,获得中心城区的地面沉降数据,再与长江水面进行对比分析^[18],研究水面变化与地表形变的相关性。在1年的观测期间内,可见武汉市城市地面出现明显的抬升现象,上升幅度达到18 mm,地面抬升呈现非常规则的条带分布,最大的抬升点全部集中于湖泊或湿地。

2.2 地表形变与江面高度的关系

通过回归分析地表高程观测站点的垂向形变数据和长江水面高程数据,获得地表形变量 y (单位mm)与水面高程 x (单位m),统计结果^[18]显示,两者存在很好的线性关系,公式如下:

$$y = 0.9845x - 1.2857 \quad (2)$$

其均方差为6.02 mm/a,确保了地表形变测量数据的高精度和高可靠性。

式(2)反映了全部基准点的统计稳态结果,如果要保持地表的高程不变,江面高程应高于1.3 m左右。本文选择的江面高程数据是以d为单位的时间序列,而在2015-04—2016-04观测期内,Sentinel-1A TOPS提供了15幅多期次的宽影像,也形成了时间序列,可与江面高程数据进行时间序列的对比分析。

为了研究地表形变与江面水面高程的关系,选择靠近水文观测井及附近的6个观测点,如图3所示。6个观测点编号从PS1到PS6,江面高程用WL标示,对比结果如图4所示。由监测结果可见地面呈现周期性起伏,江面也呈现周期性起伏,两者存在时间相位的同步特征。当江面水面处于高位时,地面抬升;反之,当江面水面降低时,同步发生地面沉降。值得指出的是,PS2观测点的上升幅度大于其他观测点,这是因为该观测点附近地表建设相对较少,有利于土壤水的渗流运动。

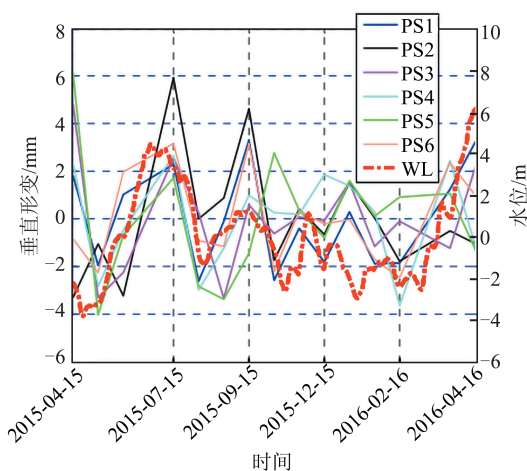


图4 观测点(PS1-PS6)地表垂直形变与长江水位变化(WL)时间序列

Fig.4 Time Series of Vertical Surface Deformation at Observation Points (PS1-PS6) and Water Level Change (WL) of the Yangtze River

4月—9月是多雨季节,雨水充沛,江面起伏大,地面起伏也大,期间两次江面抬升引起短期的地面抬升,如图4所示。4月—7月最大起伏量达8 mm。8月地面沉降,江水水面较低。9月—3月是旱季,降雨量较少,江面在低高度下起伏,地面也呈现低幅度的起伏,沉降量多于上升量。

长江武汉段的水位除了受季节、降雨的影响外,还受到上游流量的影响。图4中,7月上旬的最高水位是上游洪峰所致。2015-09-04 8:00—

2015-09-05 8:00降雨过程累计雨量分布图如图5所示,在观测时间段内有一次最大的降雨过程。在市区长江以北形成强降雨区,累计平均降雨量超过100 mm。本轮强降雨滞后洪峰期近2个月,没有在城区形成任何洪涝灾情。本轮强降雨也引起了江面的次高峰涨幅,明显低于7月洪水引起的江水水面涨幅,地面上的上升幅度呈现次高峰特征。说明武汉市地面抬升与江面高程变化同步,其内因是上游来水和辖区降雨量的共同作用。

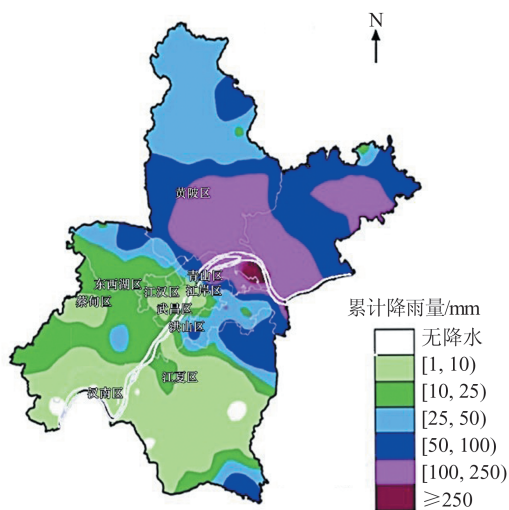


图5 累计降雨量分布图(2015-09-04 8:00—2015-09-05 8:00)

Fig.5 Accumulated Rainfall Distribution Map During the Observation Period from 2015-09-04 8:00 to 2015-09-05 8:00

受上游水流量、湖泊库容大小、排水量等多因素的影响,降雨量与长江水面高程并不呈现简单的线性关系。长江水面的起伏与降雨量密切相关,降雨会抬升长江水面的高度。当降雨量峰值与上游来水的洪峰同步时,叠加效应会引起长江水面高于警戒水位,易产生城市洪涝灾情;当降雨量峰值与上游来水的洪峰不同步时,长江水面不会高于警戒高度。显然,强降雨峰值期与洪峰期错开时,可保证武汉市免于洪涝灾情威胁。

3 城市地表形变机理分析

图4观测到的地表形变以地面沉降为主,也有明显的地面抬升。地面起伏与江面升降、降雨存在关联性。因此,有必要讨论一下地表形变的机理,特别是地面抬升的机理。

3.1 城市地面沉降的机理

监测城市地面沉降的方法较多,常见的方法

包括水准测量、GPS技术、InSAR等^[6-8,18]。研究表明,高度城市化过程中人工过量采水和城市漏斗是导致武汉市出现大部分沉降区的人为因素,这些人为致因具有全球城市化的共性。控制人为因素的影响能大大减少地面沉降。

3.2 城市地面抬升的机理

现代监测技术都能发现明显的城市地面抬升现象^[6-8,18],并与地面下沉的幅度相当。但是,城市地面抬升现象常常被忽视,地面上的因素有多方面。

1) 构造因素

古地理环境研究表明,武汉市5 000年前的洪水水位比现在的洪水水位低20 m左右,说明全新世中晚期以来,武汉市地壳持续上升的过程明显。碳14年代检测结果^[23]表明,武汉市区域构造引起的地表抬升速率为0.5 mm/a。这种地表抬升其实是地块区域性的稳定抬升。对于这种整体性的稳定上升运动,InSAR技术无法鉴别出来,也不是本文的研究重点,后续将不予讨论。

2) 洪积作用

长江在中游存在严重的泥沙淤积问题^[24],每年有1.24亿吨泥沙沉积于中游河湖中。长江中游的泥沙,淤大于冲,总体而言是沉积加厚,尤其是长江干流以武汉市为中心的螺山-武汉-黄石段以及洞庭湖区和鄱阳湖区,淤积导致武汉段及上游江段的水位抬高,堤外滩及洪水位与构造沉降的堤内平原间的高差不断增大,也增加了筑堤防洪的压力^[24-25]。城市洪涝产生的洪积作用将上游及本地泥沙引向湖区甚至干流,泥沙淤积速度远大于河流正常的沉积作用。

3) 人工填湖

武汉市人工填湖的历史源于筑坝防洪。构筑江堤防止两江改道,在地势相对高的地方建设防洪设施,分块治水。武汉市后期人工填湖则是满足粮食需求,在20世纪80年代以前,围湖造田将湿地变为耕地。80年代以后,城市化进程加快,房地产开发导致湖泊面积快速减少,2000年以后,湖泊加速萎缩^[7,26-27]。表1为武汉市中心城区近30年的湖泊面积变化,可见沙湖和南湖的面积变化较快。

人工填湖导致的地面抬升会导致湖泊环境快速毁灭。随着城市基础设施和居民房屋的建设需求,填湖进程加快,湿地面积快速减少。洪积作用以及人工填湖均集中于湖泊或附近低洼地区,较易识别。

表 1 武汉市中心城区近 30 年湖泊面积变化

Tab.1 Changes of Lake Areas in Wuhan Central District
During 30 Years

统计年份/年	湖泊面积 /km ²	沙湖面积/ km ²	南湖面积/ km ²
1987	152.2	8.3	15.4
1994	154.4	7.4	14.4
2001	137.7	4.5	12.8
2005	114.5	3.1	8.2
2009	88.1	2.5	7.7
2013	81.0	2.5	7.4
2016	81.0	2.3	7.1

4) 土壤水物化膨胀

土壤的水物化膨胀效应是本文关注的重点。图 3 所示的蓝色区域为上升区,主要是土壤水物理膨胀和化学膨胀造成的。如前所述,武汉市广泛分布的冲积平原主要由第四系粉质粘土、淤泥质粉质粘土等组成。土壤富含大量的孔隙水,在干湿过程中会产生物理膨胀和化学膨胀效应。

土壤水物理膨胀效应是土壤中的粘粒容积随含水量的变化而改变^[28-30],同时也改变了土壤容重。物理膨胀效应通常用土壤胀缩特征曲线描述^[31],这种特征曲线的本质是将土壤含水量与土壤机械特性进行关联分析。实验研究表明,土壤胀缩特征曲线随土壤矿物质成分、孔隙度等因素的变化呈现较大的差异,而三直线模型^[32]可以描述大部分土壤在滞留、正常、结构区段土壤胀缩的物理性质,如下所示:

$$v_i = k_i + r_i U \quad (3)$$

式中, v_i 为比容积($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$); U 为质量含水量($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); $i=1,2,3$ 为土壤胀缩的 3 个阶段,依次为滞留、正常、结构。土壤胀缩包括水平和垂向形变,当观测方向为垂向形变时,Bronswijk^[33]定义了几何参数 r_s 描述体积和高度的变化关系,如下所示:

$$r_s = (\ln \frac{V_j}{V_s}) / (\ln \frac{z_j}{z_s}) \quad (4)$$

式中, V_s 和 z_s 分别为土柱饱和时的体积和高度; V_j 和 z_j 分别是第 j 次测定的土柱体积和高度。式(4)说明土壤容量的改变取决于垂向形变,当土壤垂直形变远大于水平形变时, $r_s=1.0$ 。结合式(3)和式(4),水容量的改变可简化为:

$$\Delta U = \gamma \Delta z \quad (5)$$

式中, ΔU 和 Δz 分别为土壤含水量的改变量与垂向形变量; γ 为常数。土壤膨胀模型试验结果^[28-33]确实反映了孔隙介质中土壤水的改变是土壤垂向形变的主因,也就是土壤胀缩的主因,土壤颗

粒视为刚性。

土壤水化学膨胀效应是因为粘土中可交换的阳离子在水中分解形成扩散双电层,带负电的片状结构因静电斥力自行分开而引起粘土膨胀^[34-35]。脱水过程刚好相反,双电层消失,脱水紧缩。粘土沉积物中的阳离子含量、结合水含量、表面水化力、渗透水化力和毛细管作用等是制约粘土水化膨胀的多种因素^[34]。调查发现,武汉市所有湖泊底泥中的阳离子丰富,重金属含量污染严重,市区内湖泊沉积物的重金属含量普遍高于郊区湖泊^[35],说明湖泊重金属的污染是人文活动所致^[36]。

相对而言,土壤水的物理胀缩效应比化学胀缩效应更易于量化土壤水的改变量,只要监测到土壤的垂向形变,就能估计土壤水的改变量。当降雨量超越了土壤水的饱和状态时,土壤就不发生膨胀。最大洪水时的土壤水可以近似为极限膨胀情况。洪水与暴雨是导致武汉市土壤水增加的变量。当部分暴雨被土壤吸收形成土壤水,这个过程就是城市土壤的海绵特征,表明城市土壤具备天然的抗洪能力。

4 武汉市抗洪能力分析

4.1 洪涝事件

2013-07-06—2013-07-07,武汉市遭受特大暴雨袭击^[37]。如图 6(a)所示,中心城区的累计总降雨量超过 1.6 亿 m^3 。全市平均降雨量超过 210.9 mm,局部降雨量达到 317.2 mm(江夏区),为自 1951 年建站以来最大降雨量。

武汉市经历了 1998 年的特大洪灾后,城市江堤虽然都得到了修缮与加固,避免了江堤溃坝,但依然无法防止 2013 年的特大洪水内涝。长时间的暴雨与上游洪水叠加,使得中心城区的降雨量相当于 1.5 个东湖水体,超出了现存湖泊的极限库容^[38]。

2016-07-05—2016-07-06,暴雨再次侵袭了武汉市区域,如图 6(b)所示。全市平均降雨量为 228.6 mm,局部降雨量达到 277.6 mm(蔡甸区),超过 2013 年的平均降雨量。持续暴雨的降雨量突破了有史以来持续性周降雨量的最大值,适逢长江百年未遇的大洪水侵袭,2016-06-30 20:00—2016-07-06 20:00,市区国家站记录的本轮强降雨过程平均累计降雨量达 584.8 mm,远远超出武汉市现有排水设施的抽排能力,全市出现多处渍水点,政府启动城区排渍橙色预警。

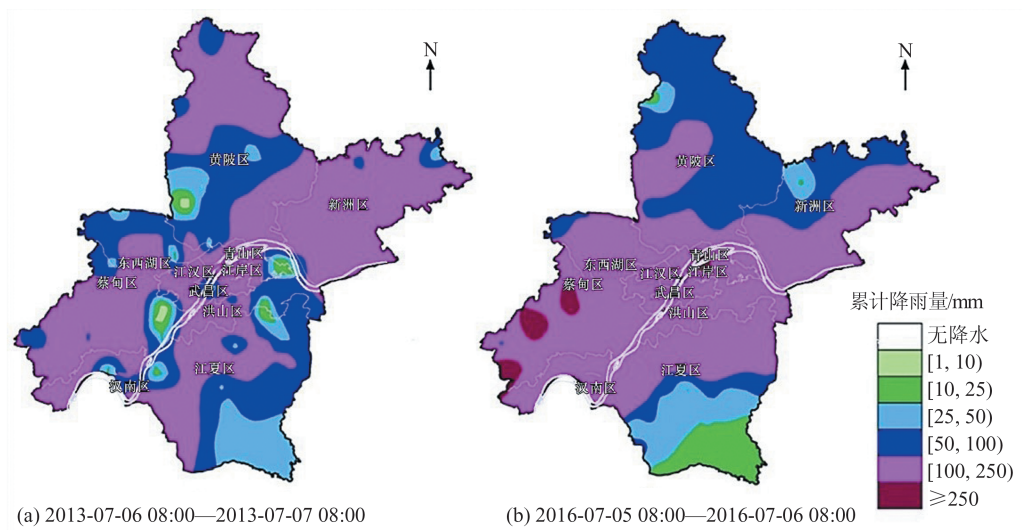


图6 武汉市两次特大暴雨累计降雨量

Fig.6 Cumulative Rainfalls of Two Extremely Heavy Rainstorms in Wuhan

4.2 抗洪能力分析

继1998年武汉市抗洪之后,国家将整治长江作为一项国策实施,形成《对1998年长江洪水的认识和今后工作的建议》^[39],提出大力加强排涝能力。虽然武汉市正在进行海绵城市建设,改善近地表水环境,但武汉市的抗洪能力仍有待加强。

武汉市的抗洪能力包括3个方面^[40-42]:湖泊水容能力(W_1)、抽排能力(W_2)、海绵城市水容能力(W_3)。按中心城区600 km²的面积和25%的湿地面积估计24 h的降雨量。

1) 湖泊水容能力

$$W_1 = 600 \text{ km}^2 \times 25\% \times 1.0 \text{ m} = 1.5 \times 10^8 \text{ m}^3 \quad (6)$$

这个容量相当于250 mm的降雨量。

2) 抽排能力

据武汉市水务系统信息,武汉现有向外抽排能力达970 m³/s,则:

$$W_2 = 970 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \times 24 \text{ h} = 8.38 \times 10^7 \text{ m}^3 \quad (7)$$

相当于1天就可排出600 km²面积140 mm的降水。

3) 海绵城市水容能力

湖泊水容能力(W_1)和抽排能力(W_2)达到390 mm。目前,武汉市海绵城市建设目标为10%的降雨滞留,按300 mm降雨量、10%的滞蓄能力计算,则:

$$W_3 = 600 \text{ km}^2 \times 10\% \times 300 \text{ mm} = 1.8 \times 10^7 \text{ m}^3 \quad (8)$$

海绵抗洪能力仅为30 mm,合计 W_1 、 W_2 、 W_3 3项的抗洪能力约为420 mm。在这3项抗洪能力

中,海绵抗洪能力相对较弱,湿地的抗洪能力排第一位。显然,湖泊水容是防止洪涝最有效的办法。研究表明^[38],武汉市60年以来湖泊数量锐减,对比如表2所示。正是因为水体锐减,造成无力抗拒2016年的特大洪涝。正常情况下,60年前的水容量足以应对500 mm的强降雨。

表2 武汉市60年湖泊防洪能力对比

Tab.2 Comparison of Flood Control Capacity of Wuhan Lakes During 60 Years

时间	湖泊数/个	池塘数/个	水面占比	抗洪能力/mm
60年前	500	10 000+	50%+	500
2020年	189	6 000—	25.8%	258

注:“+”为超出,“—”为不足

5 雨洪的资源化利用

面对武汉市的暴雨灾害,一方面城市水体面积的扩容十分有限,另一方面武汉市特有的地貌与沉积环境优势被忽视。巨厚的堆积平原是隐伏的海绵体,可以将灾害性质的雨洪转变为水资源,结合城市地面上的信息可以估计海绵体的水容能力。

5.1 被低估的土壤水容能力

海绵城市建设将灾害性质的暴雨资源化利用是一种极好的策略。式(8)反映了当前海绵城市建设的目标和抗洪能力,但这种能力被严重低估。

图3说明,在江湖湿地等平原地域多为沉降区,丧失了水容能力。而剥蚀残丘和堆积垅岗均

是地面上升区,土壤处于不饱和状态,以15%孔隙度、不饱和度50%、面积占比60%、地层厚度10 m为基础,估计土壤水容能力为:

$$W_3 = 600 \text{ km}^2 \times 15\% \times 60\% \times 50\% \times 10 \text{ m} = 2.7 \times 10^9 \text{ m}^3 \quad (9)$$

显然,式(9)估计的水容量是式(8)估计的100多倍,相对于吸收4 500 mm的降雨量。即使是利用1 m厚的土壤海绵体功能,也有吸收450 mm降雨量的能力;如果土壤厚度增加,水容量将进一步增加。因此,土壤孔隙具有抗洪的巨大潜力,未来的抗洪方向之一是聚焦于开发和利用这种潜力。

5.2 雨洪资源化利用

城市洪水无疑是一种自然灾害,但是将雨洪转化为资源,促进人与自然和谐,是国家不断提倡的战略目标^[43-45]。武汉市历史的治水模式主要是控制洪水,将洪水挡于城外;引导和管理洪水是将洪水资源化的有效举措。目前,洪水资源化的研究与建议主要是增加蓄洪水库、深挖蓄水湖泊、改善水库和湖泊的调蓄功能等^[46-48],这不仅能够利用蓄滞洪区,又能促进土壤的生态平衡。

地表形变的观测结果表明,城市土壤圈具有很强的蓄水特性,地面上升区表明城市土壤呈现明显的“饥渴”状态,通过扩展城市地面的海绵特征,以最大限度地蓄水。而增强城市土壤圈的海绵特征就是要增强地面的渗水性,如增加绿地、植被、多孔隙路面等。

6 结 语

城市的地表形变通常关注地面沉降的原因,而城市地面的上升趋势以及隐含的信息往往被忽视。本文基于2015-04—2016-04 InSAR数据和110个基准点信息发现,武汉市中心城区的形变速率为-82~18 mm/a,下降幅度大于上升幅度。

本文研究表明,城市土壤圈大部分上升区的土壤呈现为不饱和或“饥渴”状态,城市的最大垂向形变量可达到18 mm/a,反映了雨水滞留膨胀的极限情况;未达到极限状态的“饥渴”土壤具有吸收雨水的潜力,这意味着城市的雨洪可以进行资源化利用。此外,地面上升呈现带状分布,也揭示了雨水的径流方向,有利于雨水系统的收集与抗洪作用。

参 考 文 献

- [1] Xiao Heping. Urban Geological Disaster and Counter Measures[J]. *Journal of Catastrophology*, 2000, 15(2):39-43 (肖和平. 城市地质灾害及对策[J]. 灾害学, 2000, 15(2):39-43)
- [2] Fedeski M, Gwilliam J. Urban Sustainability in the Presence of Flood and Geological Hazards: The Development of a GIS-Based Vulnerability and Risk Assessment Methodology [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(1): 50-61
- [3] Zou Jun, Li Shuping. Analysis of Chinese Media Reports on Urban Storm Events in 2012 [J]. *China Public Security (Academy Edition)*, 2013(2): 23-29 (邹俊, 李树平. 2012年国内媒体报道城市暴雨事件分析[J]. 中国公共安全(学术版), 2013(2): 23-29)
- [4] Wu Yucheng. Analysis on the Causes of Frequent Occurrence of Urban Waterlogging in China [J]. *China Flood & Drought Management*, 2011, 21(6): 7-8, 15 (吴玉成. 我国城市内涝灾害频发原因分析[J]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(6):7-8, 15)
- [5] Xiang Jiuhua, Wang Liang. Discussion on Coping with Urban Waterlogging Disaster in Wuhan, Hubei Province [J]. *China Flood & Drought Management*, 2013, 23(1): 24-27, 34 (项久华, 王亮. 湖北武汉市应对城市内涝灾害探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2013, 23(1):24-27, 34)
- [6] Zhang Yuan, Zhang Li, Chen Nan, et al. Application Demonstration of Water Environment Remote Sensing Monitoring for Small to Medium-Sized Lakes in Hubei Province [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(1): 131-136 (张媛, 张琰, 陈楠, 等. 基于湖北省12个中小型湖泊的水环境遥感监测应用示范[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 131-136)
- [7] Yu Xiaojuan. Analysis of Dynamic Change of Lake Area in Wuhan City from 1987 to 2016 Based on Landsat Image[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2018 (喻晓娟. 基于Landsat影像的1987—2016年武汉市湖泊面积动态变化分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2018)
- [8] Chen Jiwei. Urban Subsidence Monitoring by Using the New Technology of Spaceborne Interferometric SAR [J]. *Shanghai Geology*, 2001(2): 45-50 (陈基伟. 新技术在城市地面沉降研究中的应用——遥感卫星雷达干涉测量(InSAR)[J]. 上海地质, 2001(2):45-50)
- [9] Duan Guangyao. Extraction of Urban Building Plot Ratio and Analysis of Its Relationship with Land

- Subsidence [D]. Beijing: Capital Normal University, 2012 (段光耀. 城市建筑容积率提取及其与地面沉降关系分析[D]. 北京:首都师范大学, 2012)
- [10] Liu L, Schaefer K M, Chen A C, et al. Remote Sensing Measurements of Thermokarst Subsidence Using InSAR[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(9): 1 935-1 948
- [11] Zhang Yonghong, Liu Bing, Wu Hong'an, et al. Ground Subsidence in Xiong'an New Area from 2012 to 2016 Monitored by InSAR Technique[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(5): 652-662 (张永红, 刘冰, 吴宏安, 等. 雄安新区2012—2016年地面沉降InSAR监测[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(5): 652-662)
- [12] Lai Shaocong, Zhang Guowei, Dong Yunpeng. Geochemical Features and Its Tectonic Significance of the Meta-Basalt in Zhoujiawan Area, Mianlue Suture Zone, Qinling-Dabie Mountains, Hubei Province [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 1998, 18(2): 2-9 (赖绍聪, 张国伟, 董云鹏. 秦岭-大别勉略缝合带湖北随州周家湾变质玄武岩地球化学及其大地构造意义[J]. 矿物岩石, 1998, 18(2): 2-9)
- [13] Li Yalin, Li Sanzhong, Zhang Guowei. Composition of the Mianlue Suture and Its Relation with the Evolution of the Old Oceanic Basin[J]. *Geology in China*, 2002, 29(2): 129-134 (李亚林, 李三忠, 张国伟. 秦岭勉略缝合带组成与古洋盆演化[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 129-134)
- [14] Chen Hong, Hu Jianmin, Wu Guoli, et al. Study on the Intracontinental Deformation of the Mianlue Suture Belt, Western Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1 277-1 288 (陈虹, 胡健民, 武国利, 等. 西秦岭勉略带陆内构造变形研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1 277-1 288)
- [15] Li Yitian, Ni Jinren. Influence of Sediment Transport to Water Level Elevating in the Middle Reach of Yangtze River[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1998, 6(3): 5-11 (李义天, 倪晋仁. 泥沙输移对长江中游水位抬升的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 1998, 6(3): 5-11)
- [16] Feng Xiaola, Chen Jiahong, Huang Jingxian. On the Evaluation Method of Soft Soil Foundation Stability During Construction[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1992, 19(2): 18-20, 29 (冯晓腊, 陈加红, 黄靖贤. 软土地基施工期稳定性评价方法的探讨[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(2): 18-20, 29)
- [17] Sun Xiaoying, Feng Xiaola, Xu Sheng. Stability Evaluation of the Nested Deep Excavations for Wuhan-Centre Foundation [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2013, 27(1): 17-20 (孙晓英, 冯晓腊, 徐升. 武汉中心深基坑工程坑中坑稳定性分析[J]. 土工基础, 2013, 27(1): 17-20)
- [18] Zhou L, Guo J, Hu J, et al. Wuhan Surface Subsidence Analysis in 2015—2016 Based on Sentinel-1A Data by SBAS-InSAR [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1-21
- [19] Chen C T, Hu J C, Lu C Y, et al. Thirty-Year Land Elevation Change from Subsidence to Uplift Following the Termination of Groundwater Pumping and Its Geological Implications in the Metropolitan Taipei Basin, Northern Taiwan [J]. *Engineering Geology*, 2007, 95(1): 30-47
- [20] Aldiss D, Burke H, Chacksfield B, et al. Geological Interpretation of Current Subsidence and Uplift in the London Area, UK, as Shown by High Precision Satellite-Based Surveying [J]. *Proceedings of the Geologists Association*, 2014, 125(1): 1-13
- [21] Luo Q L, Perissin D, Zhang Y, et al. L- and X-Band Multi-temporal InSAR Analysis of Tianjin Subsidence [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6: 7 933-7 951
- [22] Zhang Y, Wu H, Kang Y, et al. Ground Subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1992 to 2014 Revealed by Multiple SAR Stacks[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8: 675
- [23] Yang Dayuan. The Evolution of the Mid-Lower Changjiang River in the Last 5 000 Years[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 1989, 25(3): 167-173 (杨达源. 近五千年来长江中下游干流的演变[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1989, 25(3): 167-173)
- [24] Yin Hongfu, Chen Guojin, Li Chang'an, et al. Sedimentation in the Middle Reaches of the Yangtze River [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2004, 34(3): 195-209 (殷鸿福, 陈国金, 李长安, 等. 长江中游的泥沙淤积问题[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(3): 195-209)
- [25] Li Yitian, Sun Zhaohua, Deng Jinyun, et al. Variation of Sediment Transport and Flood Disaster in the Middle Reach of Yangtze River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(2): 33-39 (李义天, 孙昭华, 邓金运, 等. 泥沙输移变化与长江中游水患[J]. 泥沙研究, 2004(2): 33-39)
- [26] Ma Jianwei, Huang Shifeng, Xu Zongnan. Satellite Remote Sensing of Lake Area in Wuhan from 1973 to 2015 [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(8): 903-913 (马建威, 黄诗峰, 许宗男. 基于遥感的1973—2015年武汉市湖泊水域面积动态监测与分析研究[J]. 水利学报, 2017, 48(8):

- 903-913)
- [27] Zhang Yi, Kong Xiangde, Deng Hongbing, et al. Change Characteristic of Lakes in Hubei Province in the Past 100 Years[J]. *Wetland Science*, 2010, 8(1): 15-20 (张毅,孔祥德,邓宏兵,等. 近百年湖北省湖泊演变特征研究[J]. 湿地科学, 2010, 8(1): 15-20)
- [28] Allbrook R F. Shrinkage of Some New Zealand Soils and Its Implications for Physics [J]. *Aust J Soil Res*, 1992, 3: 111-118
- [29] Yong R N, Warkentin B P. Soil Properties and Behavior [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1975
- [30] Yang Shaoe, Huang Yuanfang. Discussion on Soil Shrinkage Characteristic Curves [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 749-752 (杨绍镠, 黄元仿. 关于土壤收缩特征曲线的探讨[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 749-752)
- [31] Mitchell A R, van Genuchten M Th. Shrinkage of Bare and Cultivated Soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 1 036-1 042
- [32] Huang Chuanqin, Shao Ming'an. Experimental Study on Soil Shrinking and Swelling Characteristics During the Alternative Drying and Wetting Processes [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1 243-1 247 (黄传琴,邵明安. 干湿交替过程中土壤胀缩特征的实验研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1 243-1 247)
- [33] Bronswijk J J B. Shrinkage Geometry of a Heavy Clay Soil at Various Stresses [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, 54: 1 500-1 502
- [34] Zhang Xianwei, Wang Changming, Li Junxia. Experimental Study of Coupling Behaviors of Consolidation-Creep of Soft Clay and Its Mechanism [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(12): 3 584-3 590 (张先伟,王常明,李军霞. 软土固结蠕变特性及机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3 584-3 590)
- [35] Qiao Shengying, Jiang Jingye, Xiang Wu, et al. Distribution of Heavy Metals in Sediments in Lakes in Wuhan with Assessment on Their Potential Ecological Risk [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(3): 353-357 (乔胜英,蒋敬业,向武,等. 武汉地区湖泊沉积物重金属的分布及潜在生态效应评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 353-357)
- [36] Yang Handong, Nong Shengwen, Cai Shuming, et al. Environmental Geochemistry of Sediments in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1994, 18(3): 208-214 (杨汉东,农生文,蔡述明,等. 武汉东湖沉积物的环境地球化学[J]. 水生生物学报, 1994, 18(3): 208-214)
- [37] Qi Haixia, Gu Xuzan, Bai Yongqing, et al. Simulation and Diagnosis of the Evolution Characteristics of a Meso- β Scale Heavy Rainstorm Event in Hubei in 2013 [J]. *Meteorology Monthly* 2017, 43(3): 268-277 (祁海霞,辜旭赞,白永清等. 2013年湖北一次大暴雨 β 中尺度分析和模拟诊断[J]. 气象, 2017, 43(3): 268-277)
- [38] Shi Xuwu, Zha Dongshan. Considerations on Saving Lakes in Wuhan [J]. *China Water Resources*, 2005 (7): 61-63 (施绪武,阚东山. 抢救武汉湖泊的思考[J]. 中国水利, 2005(7): 61-63)
- [39] Qian Zhengying. Viewpoints on the Flood of the Changjiang River in 1998 [J]. *Science & Technology Review*, 1998(12): 4-7 (钱正英. 对1998年长江洪水的一些认识[J]. 科技导报, 1998(12): 4-7)
- [40] Zhou Geng. Study on Draining System for Optimizing Operation of Shahu Lake in Wuhan [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004 (周耕. 武汉市沙湖地区排水工程优化运行研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004)
- [41] Jia Shaofeng. Suggestions on Giving Full Play to the Advantages of Lake Regulation and Storage to Prevent Waterlogging in Wuhan [J]. *China Water Resources*, 2017(7): 36-37 (贾绍凤. 关于武汉市发挥湖泊调蓄优势防治内涝的建议[J]. 中国水利, 2017(7): 36-37)
- [42] Zhang Yi, Deng Hongbing. Discussion of the Evolution and Use of the Lakes in Wuhan [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2005, 39(4): 559-563 (张毅,邓宏兵. 武汉市城市湖泊演化及开发利用初探[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2005, 39(4): 559-563)
- [43] Research Group of National Defense Office. Flood Resource Investigation Report [J]. *China Flood & Drought Management*, 2004(2): 10-14 (国防办课题调研组. 洪水资源化调研报告[J]. 中国防汛抗旱, 2004(2): 10-14)
- [44] Shang Zhihai, Wan Fangqiu, Qiu Shijun. Study on Utilization of Urban Floods [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2006, 24(5): 7-8, 14 (尚志海, 万方秋, 丘世钧. 城市洪水资源化研究[J]. 水利经济, 2006, 24(5): 7-8, 14)
- [45] Xiang Liyun. Flood Utilization: Concept, Approach and Strategy [J]. *China Three Gorges*, 2013(5): 18-23 (向立云. 洪水资源化: 概念、途径与策略[J]. 中国三峡, 2013(5): 18-23)
- [46] Huo Shuping. Discussion on Flood Utilization [J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2014(4): 145-146 (霍树萍. 对洪水资源化的探讨[J]. 内蒙古水利, 2014(4): 145-146)

- [47] Qi Yongcai. Review of Flood Resources Research Under Changing Environment [J]. *Harnessing the Huaihe River*, 2015(6):11-12 (齐永才. 变化环境下的洪水资源化研究评述[J]. 治淮, 2015(6): 11-12)
- [48] Xie Ping, Zhang Shuangxi, Wang Haihong, et al. Cross Wavelet Analysis on the Influence of the Three Gorges Dam Impounding on the Reservoir Precipitation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(6): 821-829, 907 (谢萍, 张双喜, 汪海洪, 等. 利用交叉小波技术分析三峡水库蓄排水过程对库区降雨量的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(6): 821-829, 907)

Detection of the Urban Surface Deformation and New Strategy for Flood Prevention in Wuhan Central District

XIE Ping¹ ZHANG Shuangxi^{2,3} ZHOU Lü⁴ LI Qinglong² XIAO Jiahao² CAI Jianfeng²

¹ Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China

² School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

⁴ College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: Objectives: The urban floods occurred in 2013 and 2016 exposed the serious shortages of Wuhan infrastructures to resist weathering disasters. Traditional drainage of Wuhan against urban flood enfaces the challenges due to the sharp decrease of water area. A large amount of rainwater flows into the Yangtze River, aggravating the downstream flood. **Methods:** A new strategy is proposed to control the urban rainwater by using the “thirsty” soil to absorb rainwater. The expansion of soil moisture characterizes the water absorption capacity of soil. In principle, the saturated soil expands and raises ground surface; on the contrary, the thirsty soil shrinks in volume and results into ground subsidence. It becomes a better strategy to control urban flood by utilizing this absorption capacity of thirsty soil, not only transforming the rainwater disaster into water resources, but also improving the ecology of urban pedosphere. The natural fluctuation of urban ground deformation is measured to roughly estimate the potential capability of water absorption. We took use of InSAR (interferometric synthetic aperture radar) data and 110 datum points in Wuhan center to inverse the surface deformation during the temporal window of 2015-04 to 2016-04. **Results:** The measured results demonstrated that the uplift of Wuhan urban area reached 18 mm/a. The current drainage capacity of Wuhan is equivalent to 140 mm/d rainfall, the water capacity of lakes is 250 mm/d rainfall, and the flood resistance capacity of soil sponge is only 30 mm rainfall. If soil’s water absorption capacity is fully utilized, the soil sponge of 10 m soil layer can absorb 4 500 mm/d rainfall. **Conclusions:** The uplift of the urban land surface was caused by physical and chemical expansions of soil water; its potential capacity of flood control is much bigger than other methods. In addition, the zonings of surface rise indicate the runoff directions of the groundwater.

Key words: urban flood; InSAR; surface deformation; land uplift; land subsidence

First author: XIE Ping, senior engineer, specializes in applied meteorology and decision-making meteorological services. E-mail: pxie_hbqx@126.com

Corresponding author: ZHANG Shuangxi, PhD, professor. E-mail: shxzhang@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42074176, 41874169); Wuhan Demonstration Project (WHDYS-2018-006).

引文格式: XIE Ping, ZHANG Shuangxi, ZHOU Lü, et al. Detection of the Urban Surface Deformation and New Strategy for Flood Prevention in Wuhan Central District[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 1015-1024. DOI: 10.13203/j.whugis.20190439 (谢萍, 张双喜, 周吕, 等. 武汉市中心城区地表形变与洪涝灾害防治新策略[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(7): 1015-1024. DOI: 10.13203/j.whugis.20190439)