

多源数据集成在地面沉降监测研究中的应用*

杜廷芹^{1,2} 黄海军¹ 严立文¹ 马立杰¹

(¹中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071)

(²中国科学院研究生院, 北京 100049)

一直以来, 地面沉降因其特殊的区域性、灾害性、累进性和不可逆性等特点, 严重影响和制约着区域生态环境和国民经济的可持续发展, 从而备受国内外相关学者的关注。近年来, 随着科技的进步和社会经济发展的需要, 传统、单一的地面沉降监测方法, 逐渐被日益完善起来的新型、高效、多源、经济的方法所取代。利用各种监测手段获取的地面沉降数据及目标地物特征, 以信息优化为原则, 通过有机结合, 能得到更多连续、综合、全面的信息, 不仅可以提高地面沉降信息提取的精确性和可靠性, 同时也减少了对地面沉降现象整体认识的模糊性和不确定性。

一、地面沉降信息提取的方法及特点

1. 重复性精密水准测量

常规地面沉降监测是通过分等级布设水准网, 经严密平差和数值内插来最终提取不同时期地面高程变化信息。利用该方法获得的地面沉降数据具有很高的精度和可靠性, 不过由于它作业周期长、耗费大、布网烦琐和获得信息不连续等缺陷, 致使其远远落后于新兴测量技术的发展。但就目前的应用现状来看, 因其具有高精度的技术优势, 仍被普遍地应用于验证新型地面沉降监测技术的可靠性和复杂地面沉降现象机理性的研究中(Raucoules *et al.*, 2003; Teatini *et al.*, 2005; Manzo *et al.*, 2006; Pagli *et al.*, 2006; Stein, 2005; Bitelli *et al.*, 2000; Psimoulis *et al.*, 2007)。

2. 地下凿洞与分层标方法

地下凿洞和分层标方法是高精度监测地面垂直形变量的基础性研究技术, 其测量精度可以达到 0.01~0.1mm(表 1), 但是由于成本高、效率低, 过程复杂, 该技术应用范围始终局限于工程施工测量和实验性的机理研究方面(刘毅, 2001; Raucoules *et al.*, 2003)。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40676037)。

通讯作者: 杜廷芹(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事海岸带遥感与地理信息系统方面的研究; E-mail: dutingqin1982@126.com。

表 1 地面沉降信息提取方法的比较

方法	沉降信息量	形变分量	精度/mm	时/空分辨率	主要缺陷
水准测量	点、线	垂直	1~10	低/低	成本高, 作业周期长
地下凿洞和分层标	点	垂直	0.01~0.1	高/低	成本高, 不适合大面积沉降监测
DGPS	点、线	水平/垂直	2~5/5~20	高/低	精度低
CGPS	点、线	水平/垂直	2~5/2~10	很高/很低	成本高, 作业时间长
D-InSAR	点、线、面	距离向	2~10	高/高	信号失相关
PSI	点、线、面	距离向	0.1~1	高/高	成本高, 数据需求量大
GIS	点、线	水平/垂直	>50	低/低	精度低

3. GPS 技术

近年来, 随着 GPS 技术和相关设备的持续改进与更新, 其定位的精度和速度性能都得到了极大的完善与提高, 因其在地面沉降监测中具有周期短、定位精度高、布网迅速、全天候及数据易处理等优点而备受青睐 (Bitelli *et al.*, 2005; Psimoulis *et al.*, 2007; Hu *et al.*, 2006; Sato *et al.*, 2003)。DGPS (Differential GPS) 方法在验证和判定识别大范围内地表沉降现象中, 具有简单、快速且行之有效的特点; 而 CGPS (Continuous GPS) 网络技术则可以在地面沉降机理研究中近乎连续地提供地面高程的动态变化信息。同时, 通过 GPS 技术, 还可以较高精度地获取小区域内的大气参数, 得到水气模型和大气层延迟改正模型, 来修正同期获取的受到大气延迟影响的各类影像数据 (陈基炜, 2004; 金双根等, 2001; Li *et al.*, 2006; Wadge *et al.*, 2006)。但是在实际应用中仍然存在监测范围小、高程精度低、定位结果不连续和空间分辨率低的缺点。

4. InSAR 技术

1) 传统 D-InSAR 技术

差分合成孔径雷达干涉测量技术 (D-InSAR) 是将地表发生形变前后的雷达影像通过干涉处理和相位解缠等技术来提取形变信息的一种新兴地面沉降监测手段, 它可以快速识别出大面积研究区内连续的地表形变信息, 周期短、精度高, 空间分辨率大, 目前已被广泛运用到由各种原因引起的地面沉降的监测研究中。遗憾的是, 它仅侧重于单次形变的研究, 并且对 SAR 图像质量的要求非常高, 必须保证基线距和时间间隔在一定的控制范围内, 同时它还对来自卫星轨道、大气及地面的误差都异常敏感, 造成的系统误差很难被自行消除, 迫使数据质量下降, 应用范围受到限制 (Li *et al.*, 2006; Wadge *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2004; Webley *et al.*, 2002)。

2) 改进的 D-InSAR 技术

最小二乘 (least squares, LS)、永久性散射体干涉测量 (permanent scatterer interferometry, PSI) 和小基线集 (small baseline subset, SBAS) 方法是在传统 D-InSAR 技术基础上发展起来的, 其目的是为了弥补 InSAR 技术中的时空失相关和大气效应影响的缺陷, 提高监测数据精度和影像利用率。在传统 D-InSAR 的基础上, 通过对大量 SAR 图像的研究发现, 在城市和裸岩地区长时间序列的 SAR 图像上始终存在某些相位和幅度

变化较稳定的点, 利用这些稳定点上的相位信息, 可以进行长时间尺度上由过度抽取地下水、沉积物固结压实等引起的缓慢地面沉降分析。

(1) 最小二乘(LS)技术。最小二乘(LS)方法是将求单个 SAR 图像形变的问题转化成最小二乘的问题, 利用最小二乘法, 求解在相位稳定点建立的方程组, 得到相位稳定点长时间序列的地面沉降信息。LS 方法简单地认为形变过程是线性的, 在相位解缠中的误差、DEM 误差和大气相位估计等方面均未给出明确的解释, 给出的仅是整体意义上的最优解。

(2) 永久散射体干涉测量(PSI)技术。永久性散射体干涉测量技术的原理是选取多景(一般不少于 25 景)同一地区长时间序列的 SAR 影像, 通过统计分析影像的幅度稳定性, 提取出不受时间、空间去相关和大气非均质性影响的永久性散射点(PS), 然后利用 PS 的拟合曲面计算出 DEM 误差、目标地物的偏移值和大气效应影响值, 进而获取高精度的沉降监测信息。该方法的缺点: 一是需要的影像数量多, 并且影像数量的多少将会直接影响到误差值的大小; 二是该技术只适用于监测缓慢的地面沉降问题; 三是研究区的范围受到严格的限制, 需小于 $5\text{km}\times 5\text{km}$, 同时只能适用于城市和基岩裸露较多的地区(Ferretti *et al.*, 2000)。为了进一步解决 PS 方法在实际应用中存在的问题, 拓宽 PSI 技术的应用范围, 目前又相继出现了人工角反射体技术(在缺失天然 PS 点的研究区, 人为放置金属角反射器)、相关性像元分析(coherent pixel technique, CPT, 对少量影像进行相关性域值分析提取出稳定点)技术和多平台 PS 技术(傅文学等, 2006; Ferretti *et al.*, 2000; Berardino *et al.*, 2002)。

(3) 小基线集(SBAS)技术。小基线集方法是将获得的 SAR 数据组合成若干个集合, 每个集合内 SAR 数据基线距小, 而集合间的 SAR 数据基线距大; 利用矩阵的奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法将这些小基线集联合起来求解, 从而得到不受长基线限制的地面形变信息。与传统的 D-InSAR 和 LS 技术相比, SBAS 方法可成功分离出大气相位和非线性形变相位信息, 限制了长基线导致的几何去相干, 增加了时间上的采样, 提高了 SAR 图像的利用率, 但是仍不可避免地具有与 PS 技术相类似的一些缺陷。

5. GIS 技术

GIS 技术因其特有的数据采集、空间分析、模拟和显示等功能, 目前已被成功地应用到了各类地理现象的研究分析中。利用 GIS 技术, 不仅可以成功地将早期的地面沉降信息从不同时期内含有高程信息的图片中提取出来, 而且还可以将由各种方法得到的沉降数据进行综合解译和分析, 对地面沉降现象做进一步的分析与探讨(别君等, 2006; 陈基炜, 2004)。

二、地面沉降研究中的多源信息集成方法

1. 离散点数据的整合

1) 水准测量点和 GPS 控制点

常规的水准测量和 GPS 测量得到的原始数据均是精度较高的点状信息, 可以根据研究区内的多年重复性水准测量结果, 选取出那些比较稳固的点作为研究网系的参照标准。首先, 在 DGPS 或 CGPS 测量网络中同步布设好水准测量网络, 且尽可能利用上述的点

状信息,将水准测量网格中的节点和多边形中心选在与 GPS 站点一致的位置上;然后,将在相同时间间隔内获取的数据进行统计分析,利用水准测量结果修订 GPS 网络监测系统 中的测量误差,提高其测量精度。

2) 水准测量点、GPS 控制点和角反射体的匹配

在对地形变化复杂、植被发育好的低相干性地区进行地面沉降研究时,因信号失相关和相位解缠等问题致使差分干涉测量技术在该区难以启用,人工角反射体技术的出现,适时弥补了该区 PS 点不足的问题。在放置三角反射体位置同步布置好 GPS 接收机和水准测量网点,这样在卫星过境时就会得到具有控制亮点的 SAR 图像,并同期获取这些亮点的高精度三维地理坐标,利用这些地面信息不仅有助于干涉图像处理中地面沉降量与相位变化之间拟合关系方程的方便建立,而且可以对 PS 技术获取的沉降成果数据进行精校准(陈基炜,2004;李德仁等,2004)。该方法既减少了相关因素的制约影响,得到高精度地面沉降信息,也为人工角反射体技术的验证、推广提供了参考依据。

2. 不同遥感平台的数据融合

1) 多平台 PS 技术

PSI 技术在其实现过程中需要以大量的影像数据为基础,然而在实际的应用研究中,往往会因为无法获取足量的在特定时间段内的影像,而影响该技术的使用和推广,为此,许多学者已开始致力于利用多平台数据实现 PSI 技术的实验研究。已有研究表明,不同卫星平台获取的影像中,有较高数量的 PS 点存在一致性。例如,在 ESR-1/2 影像数据中识别出的 PS 点,有 60%~70%能在 ENVISAT 影像中依然保持有 PS 点的特性,这为基于多种 SAR 影像数据的 PSI 技术在地面沉降研究中的应用提供了可能。多平台 PS 技术不仅可以解决 PSI 方法应用中的数据不足问题,而且还可以借助于各卫星系统数据获取时间上的相互穿插补充,来进一步改善利用该技术获取的形变数据中存在的低时间分辨率问题。

2) 多平台 SBAS 技术

SBAS 技术的最初数据源仅限于 ERS 数据,但随着后续 ENVISAT 的升空和 SBAS 方法的发展与完善,已有研究表明,利用 SBAS 方法将 ENVISAT 和 ERS 数据联合起来获取地表形变的技术方法完全可行,计算结果与重复水准测量结果相符。多平台 SBAS 技术的发展不仅将更多的 SAR 图像纳入到地表形变的求解中,便于进行长时间尺度的形变分析,同时还为 SBAS 技术在多领域研究中的发展和推广提供了契机。表 2 中列出了现有的卫星合成孔径雷达测量系统。另外,美国自 1978 年以来,一直利用航天飞机进行 SAR 成像实验,并陆续在多波段、多极化、双天线获取雷达数据的研究方面取得成功。随着科技进步和社会发展的需要,未来的全球星载合成孔径雷达测量系统不仅会在数量上有所增加,而且在波段种类、极化方式和工作模式等方面也势必会朝着多元化的方向发展,届时将会为基于 SAR 干涉测量技术的地面沉降研究,提供更为丰富的数据资源和有利条件。

3) 不同遥感平台的数据叠加

光学遥感卫星获取的影像图经各种彩色合成方法处理后,可以将地物信息直观地展

现在人们面前, 便于研究者的识别和判断, 并且光学遥感的高空间分辨率也是其他类遥感数据所无法比拟的。可以利用 GIS 软件将 SAR 技术监测得到的区域地面沉降结果叠加大比例尺的光学影像图上, 如叠加到研究区的航空影像图上, 以便将地面沉降情况清晰直观地反映到图片中, 为地面沉降的控制、管理和决策提供更为真实、可辨、全方位的空间信息。

表 2 现有的卫星 SAR 系统

卫星	发射 国家或机构	运行时间	轨道高度 /km	波段	极化 方式	扫面带宽/km	地面分 辨率/m	重访周期/天
ALMAZ 系列	俄罗斯	1991 年起陆续发射	300	S	HH	30~45	15~30	3~11
ERS-1/2	欧洲空间局	1991~2000 年 1995 年至今	780~790	C	VV	102.5	25	35
JERS	日本	1992~1998 年	568	L	HH	75~80	18~25	44
Radarsat-1	欧洲空间局	1995 年至今	790~821	C	HH	50~500	8~30	24
ENVISAT	欧洲空间局	2002 年至今	800	C	HH/VV	100~405	25~100	35
ALOS	日本	2006 年至今	700	L	HH/VV	40~70 250~350	7~88 100(多视)	46

3. 系统性数据融合

不同的监测系统之间存在有众多的互补性和冗余性, 若能将其进行融合, 势必会得到由单一技术系统无法达到的实用效果。

1) 双内插双估计技术

双内插双估计(the double interpolation and double prediction, DIDP)技术(陈基炜, 2004; 金双根等, 2001; Li *et al.*, 2006), 首先利用 CGPS 网络数据计算出区域内大气层延迟误差修正参数, 消减影像中的大气传输误差; 接着利用 GPS 控制点(人为放置的金属角反射器或其他金属反射点)的精确影像坐标和地理坐标对雷达卫星的轨道误差进行改正; 然后通过改正后的 InSAR 数据对 CGPS 结果进行网格式加密, 形成空间域内的形变信息, 再用具有高时间分辨率的 CGPS 数据去对前面已加密过的网格进行内插, 从而得到时间域内的形变结果; 最后对网格中的所有点进行估计, 提取出地面沉降信息。这种通过在时间域和空间域内, 分别拟合 GPS 数据和 InSAR 数据的技术方法, 成功地将 GPS 与 InSAR 技术的优势结合到一起, 实现了高精度、高时空分辨率的地面沉降监测。

2) GPS-PSI/SBAS 数据融合

PSI/SBAS 技术可以高精度地解算出连续空间范围内的地表垂直形变量, 结合 GPS 系统的精确定位及高时间分辨率的特性, 可以获取研究区内的动态形变位移量, 对分析与探讨区域地面沉降的产生机制及预测其演变趋势等研究都具有重要意义。另外, 在多平台 PS/SBAS 技术的实施过程中, 也可以考虑运用 GPS 技术来解决 PS 点在不同平台获取的影像之间存在的无法高精度定位的问题, 以促进 PSI 技术的发展。

3) PSI-SBAS 技术融合

针对 PSI 和 SBAS 方法各自的特点, 结合改进的 PSI 技术的优势, 以期能够实现在基于

少量 SAR 图像数据的基础上,进行长时间基线和长空间基线的高精度地面形变分析。

4. 基于 GIS 的特征信息叠加

将区域地面沉降监测成果图偕同其他影像、图件和各类地物特征信息统一输入到 GIS 数据库,借助其强大的空间分析功能,按指挥、控制和决策分析的需要,对各种信息做进一步的融合、解译,不断增加识别分析过程中的约束条件,使输出的结果可以更加详细、可靠地满足各类用户的研究需要。在 GIS 中,可以将不同时期、用不同方法提取到的靶区沉降数据校正到统一的参考系下,再通过对分析长期的地面沉降变化特征,来探讨沉降发生机制,预测其演变发展趋势及验证新理论新方法在区域缓慢地面沉降监测中的可靠性。

三、应用与展望

1. 地面沉降综合监测系统

地面沉降综合监测系统(subsidence integrated monitoring system, SIMS)是多源信息集成在地面沉降监测应用中的典型实例,针对地面沉降现象的现实性和多重复杂性,在地面沉降灾害比较严重的地区,根据实际需要联合多种监测技术,构建综合全面的地面沉降监测系统(Teatini *et al.*, 2005; Wadge *et al.*, 2006; Motagh *et al.*, 2007)。SIMS 可以集各种技术优势于一身,克服单一技术方法的不足,获取研究区高精度、高分辨率的地面沉降信息,对剖析地面沉降原理,创建预测计算模型,评估造成的灾害损失及布置合理的防治措施等方面提供翔实可靠的基础资料。

2. 利用多源信息集成方法研究多诱发机制条件下的地面沉降

在自然因素和人为因素的双重作用下,我国东部沿海地区普遍发生不同程度的地面沉降灾害,并已严重威胁到这些地区的生态环境和社会经济的健康发展,但是由于这些区域地面沉降范围广、历时长、时空差异大、成因复杂(构造下沉、沉积物压实、海平面上升、人类活动),且早期研究基础薄弱,故目前来看,并没有一个统一的区域性地面沉降监测网络。未来地面沉降研究的重点是对沉降量的高精度监测、沉降发生机制的探索、演变趋势的预测及其对自然环境演化影响的研究,仅依靠单一的技术方法很难满足未来研究开展的需要。多源信息集成方法的出现恰好为此提供了强有力的技术保障,利用该类方法,结合实际情况,可以选取适当的技术手段对研究的地面沉降情况做分区块、分时段、综合全面的系统性研究和分析。可以根据现有条件基础,收集不同历史时期内富含高程信息和相关地物特征信息的图件资料(如地形图、区域地质图及各沉积物类型的等厚度图等),利用 GIS 技术对其进行采集、分析,提取出研究区的地表形变信息和地物分布特征;然后根据这些在不同时段内的地面沉降变化趋势将整个的研究区域划分成不同的区块,再针对各区块内地面沉降的发展演化特点来选取相应的监测技术和方法对近期内的地面沉降做高精度的监测,并结合相应的地物特征分析各影响要素在不同期地面沉降发展过程中的影响力,从而得到各区块沉降现象的具体发生发展机制,来预测其演

化趋势和分析其环境地质效应, 为当地资源环境的可持续利用和国民经济的持续发展提供可靠的基础依据。

从国内外的应用实例和成功经验来看, 地面沉降研究中的多源信息集成方法具有非常广阔的应用前景和发展空间, 并且伴随着各种技术手段的不断革新, 该方法的显著优势将会在更大、更多、更复杂的地面沉降研究中得到更好的发挥。未来的信息集成技术应针对不同的研究任务进行进一步的优化和细化, 在由地下水抽取、油气开采、火山地震、地热场、沉积物固结压实、人类活动等造成的地面沉降研究领域分别设计更加完善的数据集成方法, 以建立专门的应用研究体系。为了对其做进一步发展完善, 在今后的研究中, 还需要在各种图像处理技术、解算方法、模型建立、融合手段、精度评定及经济实用性等方面做大量的工作。

参 考 文 献

- 别君, 黄海军, 樊辉等. 2006. 现代黄河三角洲地面沉降及其原因分析. 海洋地质与第四纪地质, 26(4): 29-35
- 陈基炜. 2004. InSAR—GPS—GIS 数据整合在地面沉降研究中的应用. 大地测量与地球动力学, 24(3): 87-91
- 傅文学, 田庆久, 郭小方等. 2006. PS 技术及其在地表形变监测中的应用现状与发展. 地球科学进展, 21(11): 1193-1198
- 金双根, 朱文耀. 2001. GPS 观测数据提高 InSAR 干涉测量精度的分析. 遥感信息, 70(4): 8-11
- 李德仁, 廖明生, 王艳. 2004. 永久散射体雷达干涉测量技术. 武汉大学学报(信息科学版), 29(8): 664-668
- 刘毅. 1999. 地面沉降加重了 1998 年中国大洪灾. 中国地质, (1): 30-32
- 刘毅. 2001. 地面沉降研究的新进展与面临的新问题. 地学前缘, 8(2): 273-278
- 单新建, 马瑾, 宋晓宇等. 2002. 利用星载 D-INSAR 技术获取的地表形变场研究张北—尚义地震震源破裂特征. 中国地震, 18(2): 119-126
- 王超, 张红, 刘智等. 2002. 基于 D-InSAR 的 1993—1995 年苏州市地面沉降监测. 地球物理学报, 45(增刊): 244-253
- 吴立新, 高均海, 葛大庆等. 2004. 基于 D-InSAR 的煤矿区开采沉降遥感监测技术分析. 地理与地理信息科学, 20(2): 22-25
- 吴涛, 王超, 张红. 2007. DInSAR 技术的最新进展. 遥感信息, (1): 84-89
- 薛禹群, 张云, 叶淑君等. 2003. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题. 第四纪研究, 23(6): 585-593
- 张景发, 龚利霞, 姜文亮. 2006. PS InSAR 技术在地壳长期缓慢形变监测中的应用. 国际地震动态, (6): 1-6
- 周建民, 何秀凤. 2005. SAR 差分干涉测量技术及其在地表形变监测中的应用现状. 河海大学学报(自然科学版), 33(4): 463-465
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R A. 2002. New algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11): 2375-2383
- Bitelli G, Bonsignore F, Unguendoli M. 2000. Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley. Journal of Geodynamics, 30(3): 355-369
- Carbognin L, Teatini P, Tosi L. 2004. Eustacy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium. Journal of Marine Systems, 51(1-4): 345-353
- Casu F, Manzo M, Lanari R. 2006. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. Remote Sensing of Environment, 102(3-4): 195-210
- Colesanti C, Wasowski J. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. Engineering Geology, 88(3-4): 173-199
- Farina P, Colombo D, Fumagalli A et al. 2006. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. Engineering Geology, 88(3-4): 200-217
- Fernández J, Yu T T, Rodriguez-Velasco G et al. 2003. New geodetic monitoring system in the volcanic island of Tenerife, Canaries, Spain. Combination of InSAR and GPS techniques. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 124(3-4): 241-253

- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (5): 2202–2212
- Fielding E J, Blom R G, Goldstein R M. 1998. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 25 (17): 3215–3218
- Gatto P, Carbognin L. 1981. The Lagoon of Venice: natural environmental trend and man-induced modification. *Hydrological Science Bulletin*, 26 (4): 379–391
- Hanssen R F. 2005. Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6 (3–4): 253–260
- Hellwich O, Ebner H. 2000. Geocoding SAR interferograms by least squares adjustment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55 (4): 277–288
- Hu J C, Chu H T, Hou C S *et al.* 2006. The contribution to tectonic subsidence by groundwater abstraction in the Pingtung area, southwestern Taiwan as determined by GPS measurements. *Quaternary International*, 147 (1): 62–69
- Hu J C, Hou C S, Shen L C *et al.* 2007. Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31 (3): 287–302
- Lanari R *et al.* 2007. Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: a case study of the Hayward fault, California. *Remote Sensing of Environment*, 109 (1): 2–28
- Lanari R *et al.* 2007. An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis. *Pure and Applied Geophysics*, 164 (4): 637–661
- Li Z W, Ding X L, Huang C *et al.* 2006. Modeling of atmospheric effects on InSAR measurements by incorporating terrain elevation information. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68 (11): 1189–1194
- Li Z W, Ding X L, Huang C *et al.* 2007. Atmospheric effects on repeat-pass InSAR measurements over Shanghai region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69 (12): 1344–1356
- Manzo M, Ricciardi G. P, Casu F *et al.* 2006. Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 151 (4): 399–416
- Meisina C, Zucca F, Conconi F *et al.* 2007. Use of Permanent Scatterers technique for large-scale mass movement investigation. *Quaternary International*, 171–172: 90–107
- Meisina C, Zucca F, Fossati D *et al.* 2006. Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: the example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy). *Engineering Geology*, 88 (3–4): 240–259
- Motagh M, Hoffmann J, Kampes B *et al.* 2007. Strain accumulation across the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 25 (3–4): 432–444
- Pagli C, Sigmundsson F, Árnadóttir T *et al.* 2006. Deflation of the Askja volcanic system: Constraints on the deformation source from combined inversion of satellite radar interferograms and GPS measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 152 (1–2): 97–108
- Pavez A, Remy D, Bonvalot S *et al.* 2006. Insight into ground deformations at Lascar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry and GPS data: Implications on volcano dynamics and future space monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 100 (3): 307–320
- Pepe A, Sansosti E, Berardino P *et al.* 2005. On the generation of ERS / ENVISAT DInSAR time-series via the SBAS technique. *IEEE Geosci. and Remote Sensing Letters*, 2 (3): 265–269
- Psimoulis P, Ghilardi M, Fouache E *et al.* 2007. Subsidence and evolution of the Thessaloniki plain, Greece, based on historical leveling and GPS data. *Engineering Geology*, 90 (1–2): 55–70
- Raucoules D, Maisons C, Carnec C *et al.* 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment*, 88 (4): 468–478
- Rott H, Nagler T. 2006. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37 (4): 710–719

- Sato H P, Abe K, Ootali O. 2003. GPS-measured land subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan . *Engineering Geology*, 67 (3-4) : 379-390
- Stanley D J. 1990. Recent subsidence and northeast tilting of the Nile delta, Egypt . *Marine Geology*, 94 (1-2) : 147-154
- Stein A. 2005. Use of single- and multi-source image fusion for statistical decision-making. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6 (3-4) : 229-239
- Teatini P, Tosi L, Strozzi T *et al.* 2005. Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system . *Remote Sensing of Environment*, 98 (4) : 403-413
- Tizzani P, Berardino P, Casu F *et al.* 2007. Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach. *Remote Sensing of Environment*, 108 (3) : 277-289
- Tomás R, Márquez Y, Lopez-Sanchez J M *et al.* 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced differential SAR interferometry: Vega media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment*, 98 (2-3) : 269-283
- Wadge G, Mattioli G S, Herd R A. 2006. Ground deformation at Soufrière Hills Volcano, Montserrat during 1998-2000 measured by radar interferometry and GPS. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 152 (1-2) : 157-173
- Wesley P W, Bingley R M, Dodson A H. 2002. Atmospheric water vapour correction to InSAR surface motion measurements on mountains: Results from a dense GPS network on Mount Etna. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27 (4-5) : 363-370
- Xu C J, Wang H, Ge L L *et al.* 2006. InSAR tropospheric delay mitigation by GPS observations: a case study in Tokyo area. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68 (6) : 629-638
- Yao G Q, Mu J Q. 2008. D-InSAR. Technique for land subsidence monitoring. *Earth Science Frontiers*, 15 (4) : 239-243

Application of Integration Methods of Multi-Source Data on Land Subsidence

DU Tingqin^{1,2} HUANG Haijun¹ YAN Liwen¹ MA Lijie¹

⁽¹⁾ Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

⁽²⁾ Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT

Land subsidence disaster has been becoming a serious concern because of its increasing hazard to environment and local sustainable development of economy. Further study on land subsidence is not only necessary for environment protection but also for scientific exploitation to resources and sustainable growth in economy, which is especially important to the eastern area of China, the most populated part of China where mining activities for oil, gas and groundwater are frequent and natural events, such as tectonic activity, sea level undulation and earthquake commonly. Over-mining and evacuation of the natural resources under the natural agents build up a considerable effect on land subsidence in the region. Various techniques have been used to detect the land subsidence, such as leveling, GPS, InSAR, PSI and GIS. However, no single-method application is satisfied in real cases. Therefore, integration of multi-sourced data is developed in this paper. In detail, ground deformation detection, data process, problem and prospect in the research are discussed.