第37卷,第1期		自	然	资	源	遥	感	Ve
2025年02月	REMOTE	SEN	SING	FOR	NAT	URAL	RESOURCES	]

#### doi: 10.6046/zrzyyg.2023208

引用格式:魏小强,杨国林,刘涛,等.基于 GRACE 与 InSAR 数据地下水变化与地面沉降滞后性研究[J].自然资源遥感,2025, 37(1):122-130. (Wei X Q, Yang G L, Liu T, et al.A study on time lags between groundwater changes and land subsidence based on GRACE and InSAR data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025,37(1):122-130.)

# 基于 GRACE 与 InSAR 数据地下水变化与 地面沉降滞后性研究

魏小强<sup>1,2</sup>. 杨国林<sup>1,2,3</sup>. 刘 涛<sup>1,2,3</sup>. 邵 明<sup>1,2</sup>. 马志刚<sup>1,2</sup>

(1.兰州交通大学测绘与地理信息学院,兰州 730070; 2.甘肃省地理国情监测工程实验室,兰州 730070;3.地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心,兰州 730070)

摘要:河西地区地下水利用比重不断上升导致地下水位显著下降,引起了局部地区地面沉降。研究河西地区地下 水变化与地面沉降滞后性对当地水资源管理、土地利用规划和农业发展具有重要意义。利用 GRACE 与 GLDAS 数 据得到研究区 2010—2017 年地下水变化速率,结合监测井实测数据验证了反演地下水变化数据的可靠性,利用小 基线集合成孔径雷达干涉测量(small baseline subset interferometry synthetic aperture Radar,SBAS-InSAR)技术得到 局部沉降区 2014 年 10 月—2017 年 6 月的地表形变速率,并用永久散射体合成孔径雷达干涉测量(persistent scatters interferometry synthetic aperture Radar,PS-InSAR)技术对结果进行对比验证,运用快速傅里叶变换和时滞相关 性分析对地下水变化与地表沉降数据解算分析。结果表明,临泽、甘州、凉州、金川沉降区地面沉降较地下水变化 滞后时间分别为 74~86 d,61~80 d,80~99 d,74~99 d;相关系数分别在 0.541~0.593,0.589~0.689,0.600~0.750, 0.543~0.630 之间。研究结果可为河西地区水资源管理、土地利用规划和农业发展提供科学依据。

关键词: GRACE; SBAS-InSAR; PS-InSAR; 地下水变化; 地面沉降; 滞后性

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 2097-034X(2025)01-0122-09

0 引言

河西走廊位于内陆干旱地区,水资源短缺,地下 水作为地表水的补充,是河西地区农业灌溉、工矿和 城市的重要水源,近年来,地下水利用比重不断上升 导致地下水位显著下降,引起了局部地区地面沉降, 直接影响了当地水资源管理、农业生产、生态保护和 城市建设的可持续发展。因此,揭示地下水变化与 地面沉降滞后性对该地区发展具有广泛而深远的影 响<sup>[1]</sup>。

当前监测地下水变化主要是利用地下水井观 测<sup>[2]</sup>,该方法观测范围小,难以满足大尺度地下水 变化<sup>[3]</sup>,而由美国航天局与德国航天局联合研制的 GRACE 卫星因其不受地形、气候等因素影响为反演 地下水动态变化提供了新的途径<sup>[4]</sup>。早期用于地 表形变监测方法包括水准测量、全球定位系统等,然 而这些方法获取数据所需成本高、覆盖范围小<sup>[5]</sup>, 耗时费力。随着合成孔径雷达干涉测量技术(interferometry synthetic aperture Radar, InSAR)发展,差分 合成孔径雷达干涉测量(differential interferometric synthetic aperture Radar, D-InSAR) 技术得到应用, 与传统测量相比具有精度高、效率快、覆盖范围广等 优点[6],已广泛运用于形变监测、滑坡灾害预测及 地震形变[5],但 D-InSAR 技术易受时空失相干与大 气延迟等因素制约<sup>[7]</sup>。为克服这些因素影响,研究 人员提出了永久散射体 InSAR 技术 (persistent scatters - InSAR, PS-InSAR)和小基线集 InSAR 技术 (small baseline subset - InSAR, SBAS - InSAR)<sup>[7]</sup> 由此,Guo 等<sup>[8]</sup>利用 GRACE 数据和 SBAS-InSAR 监 测技术得到北京地区地下水变化和地表沉降数据以 及两者之间的相关性; Vasco 等<sup>[9]</sup>利用 GRACE 和 合成孔径雷达(synthetic aperture Radar, SAR)数据 得到图莱里盆地地表沉降与地下水储量变化的关

通信作者:杨国林(1978-),男,硕士,副教授,主要从事大地测量理论及数据处理研究。Email:gl\_yang@sina.com。

收稿日期: 2023-07-14;修订日期: 2023-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目"基于重力和连续参考站的祁连山地区地壳非构造负荷垂直形变影响因素分解研究"(编号: 41764001)、"灾害场景下应急地图需求一体化建模"(编号:42261076)、兰州交通大学优秀平台(编号:201806)和兰州交通 大学天佑创新团队项目"灾害监测及应急制图"(编号:TY202001)共同资助。 第一作者:魏小强(1997-),男,硕士研究生,主要从事重力卫星在水文方面的应用研究。Email:11210895@ stu.lzjtu.edu.cn。

**第一1F有: 姚**小强(1997-),为, 侧上切光主,主要从争重力卫生性小文力面的应用切光。Email: 11210855@ su.12ju.edu.en

系; Massoud 等<sup>[10]</sup> 通过 GRACE 数据反演得到黎巴 嫩平原地下水变化趋势并结合 SAR 数据和监测井 数据证实了研究结果。基于上述研究可知,将 GRACE 与 InSAR 数据结合能够更好地揭示地下水 变化对地表沉降的影响<sup>[11]</sup>,但针对河西地区相关研 究较少,未能有效、明确地阐述当地地面沉降对地表 水变化的滞后响应。

本文利用 GRACE 和 GLDAS 数据解算得到研究 区地下水年内、年际变化数据(缺失月份数据采用 奇异谱插值法将其补齐),并用监测井实测数据验 证反演地下水变化数据的可靠性。采用 SBAS-In-SAR 技术得到地表形变数据,用 PS-InSAR 技术对 形变结果进行对比验证,在此基础上运用快速傅里 叶变换(fast Fourier transform,FFT)将地下水变化和 地表沉降数据进行解算得到地面沉降较地下水变化 滞后天数,通过时滞互相关分析两者的相关性,为今 后河西地区在水资源管理、土地利用规划和农业发 展方面提供了科学依据。

1 研究区概况及数据源

#### 1.1 研究区概况

河西走廊中东部是甘肃省主要的农业地区,包 括张掖、金昌、武威3市,地处我国西北内陆干旱地 区<sup>[12]</sup>,区域内属于典型的山地、戈壁、绿洲复合生态 系统,自然条件严酷,生态条件脆弱。开发和利用地 下水资源在其经济社会发展中占有十分重要的地 位<sup>[13]</sup>,然而由于过度开发地下水资源,含水层孔隙 水位下降<sup>[14]</sup>,引起区域性地表沉降<sup>[15]</sup>。由甘肃省 公布的地下水超开采区域中,浅层地下水和深层承 压水共划分出47处<sup>[13]</sup>,本文选取河西走廊的张掖 市临泽县、甘州区,武威市凉州区,金昌市金川区这 4处超采区来探究地表沉降对地下水变化滞后的 响应。

## 1.2 数据源

SAR 数据采用 Sentinel-1A 单式复数影像及同 期卫星精密轨道数据<sup>[16]</sup>;数字高程模型(digital elevation model, DEM)为 GDEMV2 30m 空间分辨率数 据; GRACE 数据采用德克萨斯大学空间研究中心 (Center for Space Research at the University of Teaxs, CSR)提供的 Level-2 RL06 版本的 GSM 数据模型, 时间范围为 2003 年 3 月—2017 年 6 月,阶次为 96; GLDAS 数据为 GLDAS\_NOAH025\_M\_2.1 版本的 GLDAS 模型数据<sup>[17]</sup>,时间尺度为1个月,空间分辨 率为0.25°×0.25°<sup>[18]</sup>,时间范围为2003年3月— 2017年6月;实测地下水数据来源于《中国地质环 境监测地下水位年鉴》,时间范围为2003—2016年。

## 2 研究方法

## 2.1 PS-InSAR 技术原理

PS-InSAR 技术主要通过 SAR 数据定标和配准、差分干涉 SAR 数据处理、永久性散射体点(persistent scatters, PS)选择、多影像稀疏格网相位解缠、 大气相位屏的估计和去除、像素点的时序分析和 PS 点形变值估计等步骤处理得到地面形变时间序 列<sup>[19]</sup>,处理流程如图1所示。





Fig.1 Flowchart of PS-InSAR data processing

## 2.2 SBAS-InSAR 技术原理

SBAS-InSAR 技术是利用多幅主影像与基于短时空基线准则的 InSAR 时间序列分析方法<sup>[5]</sup>,该方法首先将若干基线进行组合,产生若干对高相干的干涉图,然后基于最小二乘原理,通过相位解缠、空间滤波等方法对差分干涉图进行地表形变估计运算,再利用矩阵奇异值分解(singular value decomposition,SVD)法解算小基线集合获得地面形变时间序列<sup>[20]</sup>,处理流程如图 2 所示。

· 124 ·



图 2 SBAS-InSAR 数据处理流程



## 2.3 GRACE 时变重力场反演地下水储量

本文将 GRACE 数据中的低阶项 C20 用卫星激 光测距所测精度更高的 C20 项替换,加入 GRACE 数据计算的地心改正项修正一阶系数<sup>[21]</sup>,然后采用 高斯滤波与去相关滤波方法,把获得的研究区域真 实质量以等效水高表示为:

$$\Delta N(\theta,\lambda) = a \frac{\rho_{\text{ave}}}{3\rho_{\text{water}}} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m}^{l} \widetilde{P_{lm}}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_{l}} W_{n} [\Delta C_{lm} \cos\theta(m\lambda) + \Delta S_{lm} \sin\theta(l\lambda)] \quad , \tag{1}$$

式中:  $\Delta N$  为等效水高;  $\theta$  为地心余纬;  $\lambda$  为地心经 度; a 为地球平均半径;  $\rho_{ave}$  为地球平均密度;  $\rho_{water}$ 为水密度; l 和 m 分别 为球谐函数的阶和次; n 为重

力场模型最大阶数;  $k_l$  为 l 的负荷勒夫数<sup>[6]</sup>;  $\widehat{P_{lm}}$  为 归一化连带勒让德函数;  $\Delta C_{lm}$  和  $\Delta S_{lm}$  分别 为球谐 系数变化;  $W_n$  为高斯平滑函数<sup>[11]</sup>。

由 GRACE 数据得到的陆地水 TWS 储量变化包 含土壤水 SM、雪水 SWE、地下水 GW等,其中土壤 水、雪水可以通过 GLDAS 模型数据反演得到<sup>[11]</sup>,故 地下水平衡公式为:

$$\Delta GW = \Delta TWS - (\Delta SM + \Delta SWE) \quad , \qquad (2)$$

式中: $\Delta GW$ 为研究区地下水变化量, $\Delta TWS$ 为研究 区水储量变化量; $\Delta SM$ 为土壤水变化量; $\Delta SWE$ 为 雪水当量变化量。

#### 2.4 地面沉降与地下水变化滞后性

地下水变化与地面沉降是相关过程,通过 FFT 处理地下水变化与地面沉降数据,可得到二者在不 同频率下的幅度和相位信息,若 2 个信号存在滞后 关系,则它们在某些频率下的相位信息会发生变化, 通过分析相位变化,可得到二者滞后时间。本文运 用 FFT 将二者数据的时域信号转化为频域信号,然 后共轭相乘,再进行 FFT 逆变换得到交叉相关性延 迟数组,找到数组中最大值所对应的延迟位置,即为 滞后时间。

设地下水变化与地面沉降的时间序列 x<sub>i</sub> 和 y<sub>i</sub> 都与时滞数 τ 有关,引入时滞互相关来计算两者之 间的相关系数<sup>[22]</sup>,计算公式为:

$$K_{xy} = \frac{\frac{1}{n - \tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - \overline{x_{\tau}}) (y_{i+\tau} - \overline{y_{i+\tau}})}{\sqrt{\frac{1}{n - \tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - \overline{x_{\tau}})} \sqrt{\frac{1}{n - \tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} (y_{i+\tau} - \overline{y_{i+\tau}})} , \qquad (3)$$

式中: x 为地下水变化要素; y 为地面沉降要素;  $x_i$ 为地下水变化要素序列值;  $y_i$  为地面沉降要素序列 值; n 为序列样本数;  $\tau$  为时滞数(时滞  $\tau$  绝对值小 于等于 n/4, 且  $\tau$  为正整数);  $K_{xy}$  为相关系数;  $\overline{x_{\tau}}$  和  $\overline{y_{i+\tau}}$  分别为要素均值。

## 3.1 地面沉降

3.1.1 形变监测结果

利用 SBAS-InSAR 技术对研究区 Sentinel-1A 数据进行地表形变特征信息提取,获得沉降区地表 形变速率,如图 3 所示。由图可知,临泽沉降区地表 形变速率在-45~40 mm/a之间,在平川镇、新华镇 沉降达到了-36~-20 mm/a;甘州沉降区地表形变 速率在-30~35 mm/a之间,在上秦镇、长安镇地表 形变速率达到了-25~-10 mm/a; 凉州沉降区地表 形变速率在-45~30 mm/a之间, 在吴家井镇沉降 达到了-30~-15 mm/a; 金川沉降区地表形变速率 在-65~45 mm/a之间,在康盛村沉降达到了-45~ -15 mm/a。实验结果与已有研究成果<sup>[13]</sup>一致。从 图 3 可知,研究区局部区域有抬升现象,依据现有的 文献资料,原因有:①随着时间推移,局部地区地下 水位会通过灌溉水、降雨等方式得到恢复,导致局部 区域出现隆起现象<sup>[16]</sup>;②人为土地利用也会使地 表产生不同程度的抬升与沉降<sup>[23]</sup>;③季节性或年 际地下水位波动可能会导致局部区域抬升<sup>[24]</sup>。



图 3 沉降区年平均沉降速率



## 3.1.2 PS-InSAR 结果差异性对比

由于缺少同期地面观测数据,本文对各个沉降 区利用 PS-InSAR 技术得到的 PS 点和 SBAS-In-



SAR 技术得到的散射体位移场点(scatterer displacement field point, SDFP)进行统计分析,结果如图 4 所示。





Fig.4–1 Distribution of annual average subsidence rate

· 126 ·





自然资源遥感



由图 4 可知,沉降区由 PS-InSAR 与 SBAS-In-SAR 所获得的地表沉降点值在各个数值上分布趋 势较为相似,说明 2 种方法得到的年平均沉降速率 基本一致,但在选择备选点时由于 2 种方法局限性 等因素,得到的结果仍有细微差别<sup>[25]</sup>。

为进一步探究 2 种监测结果之间的差异,利用 ArcGIS 软件在沉降区域选取同名点(具有相同地理 坐标)建立回归方程,分析 2 种结果之间的相关性, 如图 5 所示。由图可知, PS 点和 SDFP 点形变速率 具有较高相关性,4 个沉降区 *R*<sup>2</sup> 分别为 0.837 23, 0.781 44,0.813 82,0.796 93,说明 2 种方法得到的 年平均沉降速率具有一致性,也证明了数据的可 靠性。



图 5 PS 与 SBAS 年平均沉降速率相关性



#### 3.2 地下水储量变化

3.2.1 地下水储量变化速率空间分布

用反演的地下水变化数据可得到 2010 年 1 月—2017 年 6 月年际地下水变化速率, 如图 6 所 示,临泽县、甘州区地下水变化速率为0~4 mm/a,水储量呈现缓慢增长趋势;金川区、凉州区地下水变 化速率为-10~0 mm/a,水储量变化较临泽县、甘州 区亏损严重。 第1期



图 6 年际地下水储量变化速率 Fig.6 Annual rate of change in water storage

## 3.2.2 地下水变化验证

为验证反演得到的地下水变化数据,本文采用研究区监测井实测数据与其进行对比,由于与





由图 7(a)可知,反演地下水与实测地下水在整体上波动较为一致,但反演地下水波动趋势比实测地下水更大。为了更加直观地表达二者趋势变化,将研究时间段多年数据取月平均处理,如图 7(b)所示,在 1—2月,二者均表现为下降趋势,3—5月缓慢上升,6—8月份水量最为充盈,反演地下水在 7月份水量达到最高,较实测地下水提前一个月,从 9月份开始,二者均呈下降趋势,对两者进行年内相关性分析,其相关系数为 0.867,为极强相关,说明二者具有较高的季节性相关,也验证了反演地下水数据的可靠性。

## 3.3 地面沉降与地下水变化滞后性分析

3.3.1 滞后时间计算

采用 FFT 将不同沉降区地下水变化与地面沉 降数据进行解算,结果如表1 所示。

表 1 地面沉降与地下水变化滞后时间 Tab.1 Lag time of land subsidence compared with groundwater change

with groundwater change							
地区	地表沉降速率/(mm・a <sup>-1</sup> )	滞后时间/d					
临泽沉降区	-36 ~-20	74~86					
甘州沉降区	-25 ~-10	61~80					
凉州沉降区	-30 ~-15	80~99					
金川沉降区	-45 ~-15	74~99					

由表1可知,甘州沉降区沉降速率小于临泽、凉州、金川沉降区,通过FFT 计算地表沉降较地下水变化滞后时间,临泽、甘州沉降区滞后时间少于凉州、金川沉降区。由图6地下水变化速率可知,临泽、甘州地区水储量较金川、凉州地区丰富,故地表水补充到地下含水层所需时间较短,与本文计算得出的滞后时间差具有一致性。

GRACE 结果相当的等效水位只能通过实测地下水 与给水度之积得到,因此只对二者趋势进行定性分

3.3.2 时滞互相关分析

依据式(3)时滞互相关将不同沉降区地下水变 化与地面沉降数据进行解算,结果如表2所示。由 表2可知,地面沉降与地下水变化之间的相关系数 越大,地下水变化对地面沉降影响越明显,所占比例 越高。

表 2 地面沉降与地下水变化相关系数 Tab.2 Correlation coefficient between land subsidence and groundwater change

	0	0	_
地区	时滞互相关系数	所占比例/%	
临泽沉降区	0.541~0.593	61.90	
甘州沉降区	0.589~0.689	69.23	
凉州沉降区	0.600~0.750	78.42	
金川沉降区	0.543~0.630	68.30	

· 128 ·

3.3.3 地面沉降与地下水变化关系 通过对每个沉降区若干点进行多项式拟合,得 到各个沉降区地下水变化与地面沉降时间变化曲线,如图8所示。



Fig.8 Relationship between land subsidence and groundwater change

由图 8 可知,地面沉降与地下水变化趋势较为 一致且两者之间表现出一定的滞后性,说明当地下 水位上升或下降时,地表沉降速率会相应的减慢或 加快,但由于滞后性,二者之间有一定的时间差,与 表 1—2 得出的数据具有一致性。 引起地表沉降的因素很多,且不同地区所属地 理环境与地质土层结构不一样,为了进一步分析滞 后时间与相关系数在空间上的表现,采用反距离平 均插值法得到滞后时间及相关系数的空间变化,如 图9所示。







由表1和图9可知,临泽、甘州地区地面沉降较 地下水变化的滞后时间为61~86d,凉州、金川地区 为74~99d;临泽、甘州地区地下水变化与地面沉 降相关系数也小于凉州、金川地区,临泽、甘州地区 二者相关系数在0.541~0.689之间,凉州、金川地区 相关系数在0.543~0.750之间。由此可得,地面沉 降与地下水变化时滞相关性变化空间分布规律为: 由河西走廊东部向中部先逐渐减弱,再增大;滞后 时间也符合此规律,二者具有一致性。

## 4 结论

利用 SBAS-InSAR 技术和 GRACE 时变重力场 反演数据得到了研究区地下水变化与地面沉降数 据,并采用 PS-InSAR 技术和实测地下水数据验证 了实验数据的可靠性。运用 FFT 和时滞互相关分 析解算了地面沉降较地下水变化滞后时间及相关系 数,主要结论如下: 1)2010年1月—2017年6月,凉州、金川地区 地下水变化速率在-10~0 mm/a,水储量呈现亏损 状态;临泽、甘州地区地下水变化速率在0~4 mm/a。 通过与实测地下水数据进行年内相关性分析(*R* 为 0.867),为极强相关,验证了地下水数据的可靠性。

2)利用 SBAS-InSAR 技术,得到了沉降区地表 形变数据,采用 PS-InSAR 技术对形变数据进行对 比验证,得出 2 种方法得到的年平均沉降速率具有 一致性,证明了数据的可靠性。

3)采用 FFT 计算地面沉降较地下水变化滞后时间,得到临泽、甘州、凉州、金川沉降区地面沉降较地下水变化滞后时间分别为 74~86 d,61~80 d,80~99 d,74~99 d,通过时滞互相关计算,得到相关系数区间分别为 0.541~0.593,0.589~0.689,0.600~0.750,0.543~0.630。

4)通过对地面沉降较地下水变化滞后时间及 二者相关系数空间分析可知,当地下水变化时,地表 会发生相应的变化,二者相关性与滞后时间变化规 律具有一致性。

本文通过 FFT 和时滞互相关分析得出了河西 地区地下水变化滞后时间及相关系数,为河西地区 水资源管理、土地利用规划和农业发展等提供科学 依据,但本研究只是单一分析了地下水变化与地面 沉降滞后性,对研究区部分区域抬升现象和不同沉 降等级下二者滞后性问题触及较少,下一步需结合 水准、水位和降雨等数据进一步分析滞后性规律和 抬升区域驱动机制。

## 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/gtzyg.2020.04.03.
- [2] Castellazzi P, Martel R, Galloway D L, et al. Assessing groundwater depletion and dynamics using GRACE and InSAR: Potential and limitations[J].Ground Water, 2016, 54(6): 768-780.
- [3] Castellazzi P, Longuevergne L, Martel R, et al. Quantitative mapping of groundwater depletion at the water management scale using a combined GRACE/InSAR approach[J].Remote Sensing of Environment, 2018, 205: 408-418.
- [4] Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S.Satellite-based estimates of groundwater depletion in India[J].Nature,2009,460(7258): 999– 1002.
- [5] 虎小强,杨树文,闫恒,等.基于时序 InSAR 的新疆阿希矿区 地表形变监测与分析[J].自然资源遥感,2023,35(1):171-

179.doi:10.6046/zrzyyg.2021415.

Hu X Q,Yang S W,Yan H, et al.Time-series InSAR-based monitoring and analysis of surface deformation in the Axi mining area, Xinjiang[J].Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(1): 171-179.doi:10.6046/zrzyyg.2021415.

- [6] 张庆洁,赵争,贾李博,等.黄河三角洲地面沉降现状及影响因素分析[J].测绘科学,2022,47(12):165-173.
  Zhang Q J,Zhao Z,Jia L B, et al. Analysis of land subsidence status and influencing factors in Yellow River Delta[J].Science of Surveying and Mapping,2022,47(12):165-173.
- [7] 杨 旺,何 毅,张立峰,等.甘肃金川矿区地表三维形变 InSAR 监测[J].自然资源遥感,2022,34(1):177-188.doi:10.6046/ zrzyyg.2021107

Yang W, He Y, Zhang L F, et al. InSAR monitoring of 3D surface deformation in Jinchuan mining area, Gansu Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34 (1): 177 – 188. doi: 10. 6046/zrzyyg.2021107.

- [8] Guo J,Zhou L,Yao C, et al.Surface subsidence analysis by multitemporal InSAR and GRACE: A case study in Beijing [J].Sensors,2016,16(9): 1495.
- [9] Vasco D W, Kim K H, Farr T G, et al. Using Sentinel 1 and GRACE satellite data to monitor the hydrological variations within the Tulare Basin, California [J]. Scientific Reports, 2022, 12 (1): 3867.
- [10] Massoud E C, Liu Z, Shaban A, et al.Groundwater depletion signals in the Beqaa Plain, Lebanon: Evidence from GRACE and Sentinel-1 data[J].Remote Sensing, 2021, 13(5): 915.
- [11] 费太政,常晓涛,朱广彬,等.利用 GRACE 与 Sentinel-1 反演地 下水变化与地表沉降研究[J].测绘科学,2023,48(1):140-147.

Fei T Z, Chang X T, Zhu G B, et al. Study on inversion of groundwater change and surface subsidence using GRACE and Sentinel-1 [J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(1):140-147.

- [12] 李红英,李岩瑛,王云鹏,等.河西走廊西部沙尘暴时空差异及 其动力分析[J].干旱区资源与环境,2022,36(10):104-112.
  Li H Y,Li Y Y,Wang Y P,et al.Temporal and spatial differences and dynamic analysis of sandstorms in the west of Hexi Corridor
  [J].Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36 (10):104-112.
- [13] 李平平.甘肃省地下水超采区地面沉降控制区判定方法和结果 探讨[J].中国农村水利水电,2019(6):74-77.
  Li P P.Determination method and discussion of ground subsidence control area of groundwater overmining area in Gansu Province[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(6):74-77.
- [14] Zheng M, Deng K, Fan H, et al. Monitoring and analysis of surface deformation in mining area based on InSAR and GRACE[J].Remote Sensing, 2018, 10(9):1392.
- [15] Wang Q, Zheng W, Yin W, et al. Improving the resolution of GRACE/InSAR groundwater storage estimations using a new subsidence feature weighted combination scheme [J].Water, 2023, 15 (6):1017.
- [16] Agarwal V, Kumar A, Gomes R L, et al. Monitoring of ground movement and groundwater changes in London using InSAR and GRACE[J].Applied Sciences, 2020, 10(23):8599.
- [17] Khorrami M, Shirzaei M, Ghobadi-Far K, et al. Groundwater vo-

lume loss in Mexico City constrained by InSAR and GRACE observations and mechanical models[J].Geophysical Research Letters, 2023,50(5); e2022GL101962.

- [18] Liu Z, Liu P W, Massoud E, et al. Monitoring groundwater change in California's central valley using Sentinel-1 and GRACE observations[J].Geosciences, 2019,9(10):436.
- [19] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J].
   IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38 (5): 2202-2212.
- [20] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [21] 杨国林,孙学先,胡 栋,等.利用 GRACE 数据研究柴达木盆地
   区域水储量时空变化及干旱特征[J].导航定位学报,2023,11
   (1):107-112.

Yang G L, Sun X X, Hu D, et al. Application of GRACE data in analysis on temporal and spatial changes of water reserves and drought characteristics of Qaidam Basin [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2023, 11(1):107-112.

- [22] 韦振锋,任志远,张 翀.气候因子与植被的时滞相关分析——以广西为例[J].生态环境学报,2013,22(11):1757-1762.
  Wei Z F, Ren Z Y, Zhang C. Analysis on the time-lag correlation between vegetation and climatic factors:Take Guangxi as an example[J].Ecology and Environmental Sciences,2013,22(11):1757-1762.
- [23] Hussain M A, Chen Z, Zheng Y, et al.PS-InSAR based monitoring of land subsidence by groundwater extraction for Lahore Metropolitan City, Pakistan[J].Remote Sensing, 2022, 14(16):3950.
- [24] Béjar-Pizarro M, Ezquerro P, Herrera G, et al.Mapping groundwater level and aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, Central Spain [J]. Journal of Hydrology, 2017,547:678-689.
- [25] 范 军, 左小清, 李 涛, 等. PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术对昆 明主城区地面沉降监测的对比分析[J]. 测绘工程, 2018, 27 (6):50-58.

Fan J,Zuo X Q,Li T, et al.Analysis and comparison of PS-InSAR and SBAS-InSAR for ground subsidence monitoring in the main city of Kunming[J].Engineering of Surveying and Mapping,2018, 27(6):50-58.

## A study on time lags between groundwater changes and land subsidence based on GRACE and InSAR data

WEI Xiaoqiang<sup>1,2</sup>, YANG Guolin<sup>1,2,3</sup>, LIU Tao<sup>1,2,3</sup>, SHAO Ming<sup>1,2</sup>, MA Zhigang<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 3. National –Local Joint Engineering Research Center of Technology and Application for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The increasing dependence on groundwater in the Hexi region has led to a significant drop in the groundwater table, which has induced land subsidence in some areas. Studying the relationship between groundwater changes and land subsidence hysteresis in the Hexi region holds great significance for local water resource management, land use planning, and agricultural development. This study determined the changing rate of groundwater in the study area from 2010 to 2017 using the GRACE and GLDAS data and verified the reliability of the inverted groundwater changes by combining measured data from monitoring wells. Then, this study derived the surface deformation rate of the local subsidence areas from October 2014 to June 2017 using the small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) technique, as well as comparing and validating the results using the persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) technique. Finally, this study analyzed the relationship between groundwater changes and surface subsidence data using fast Fourier transform and time-delay correlation analysis. The results indicate that the time lags between land subsidence and groundwater changes were 74~86 d, 61~80 d, 80~99 d, and 74~99 d, respectively in the Linze, Ganzhou, Liangzhou, and Jinchuan subsidence areas, with respective correlation coefficients ranging from 0.541 to 0.593, from 0.589 to 0.689, from 0.600 to 0.750, and 0.543 to 0.630, respectively. The results of this study will provide a scientific basis for water resource management, land use planning, and agricultural development in the Hexi region.

Keywords: GRACE; SBAS-InSAR; PS-InSAR; groundwater change; land subsidence; hysteresis