



基于MT-InSAR技术的北京平原区 地面沉降演化研究

高明亮, 宫辉力, 李小娟, 柯樱海

城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地

资源环境与旅游学院 · b312@cnu.edu.cn

龙计划四期· 2019-6





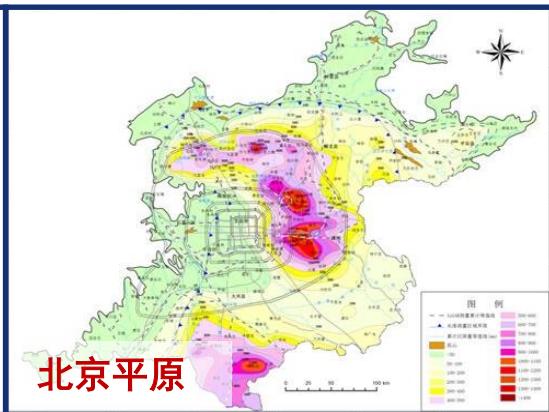
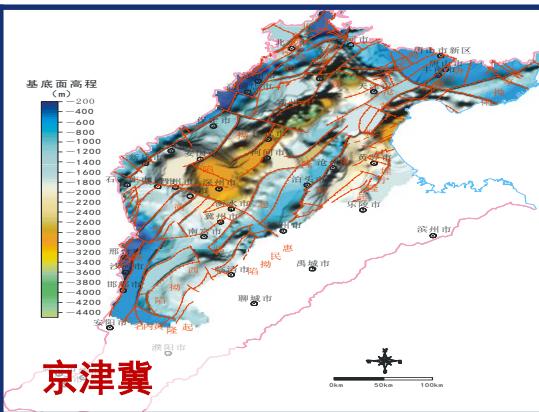
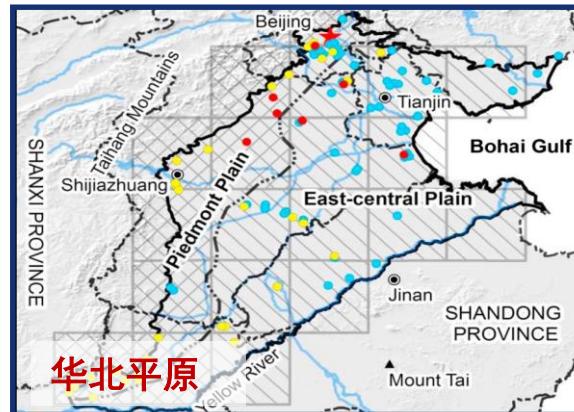
汇报提纲

- 一、背景介绍**
- 二、InSAR技术概述**
- 三、关键技术——MT-InSAR**
- 四、北京地面沉降演化特征**
- 五、地面沉降与地下水关联特征**
- 六、案例展示**

地面沉降——城市不能承受之重

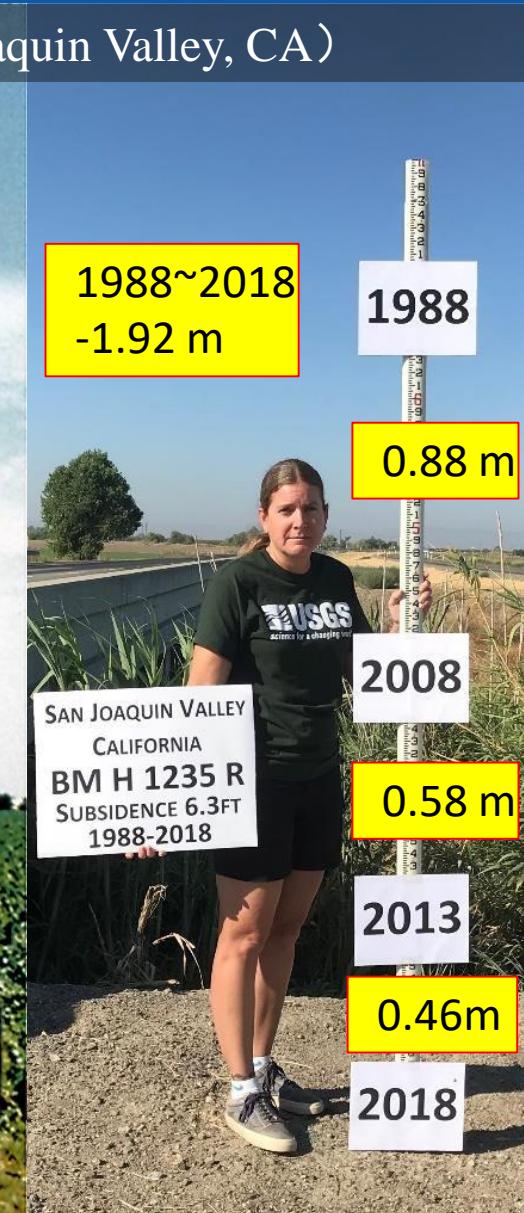
- 定义：地面沉降是在自然和人为因素综合作用下由于地层土体压缩引起的地面标高损失的环境地质现象，是一种永久性环境和资源损失。
- 区域水循环变化主控作用下，人为—自然因素综合作用的结果。
- 发生在一些发达的城市和地区，例如美国加州、墨西哥城、日本关东地区、中国的京津冀、长三角等地区，严重威胁城市安全。

超过150个国家和地区发生地面沉降，一系列的国际科学计划



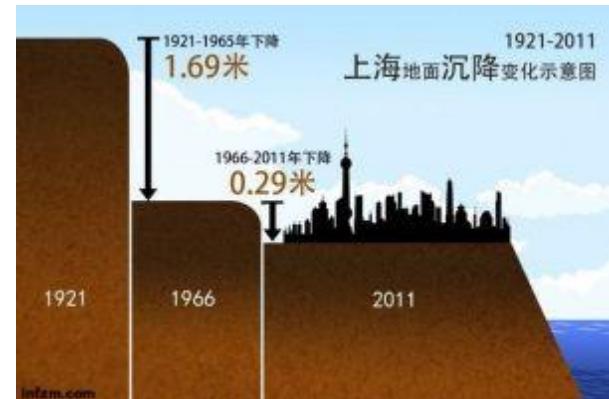
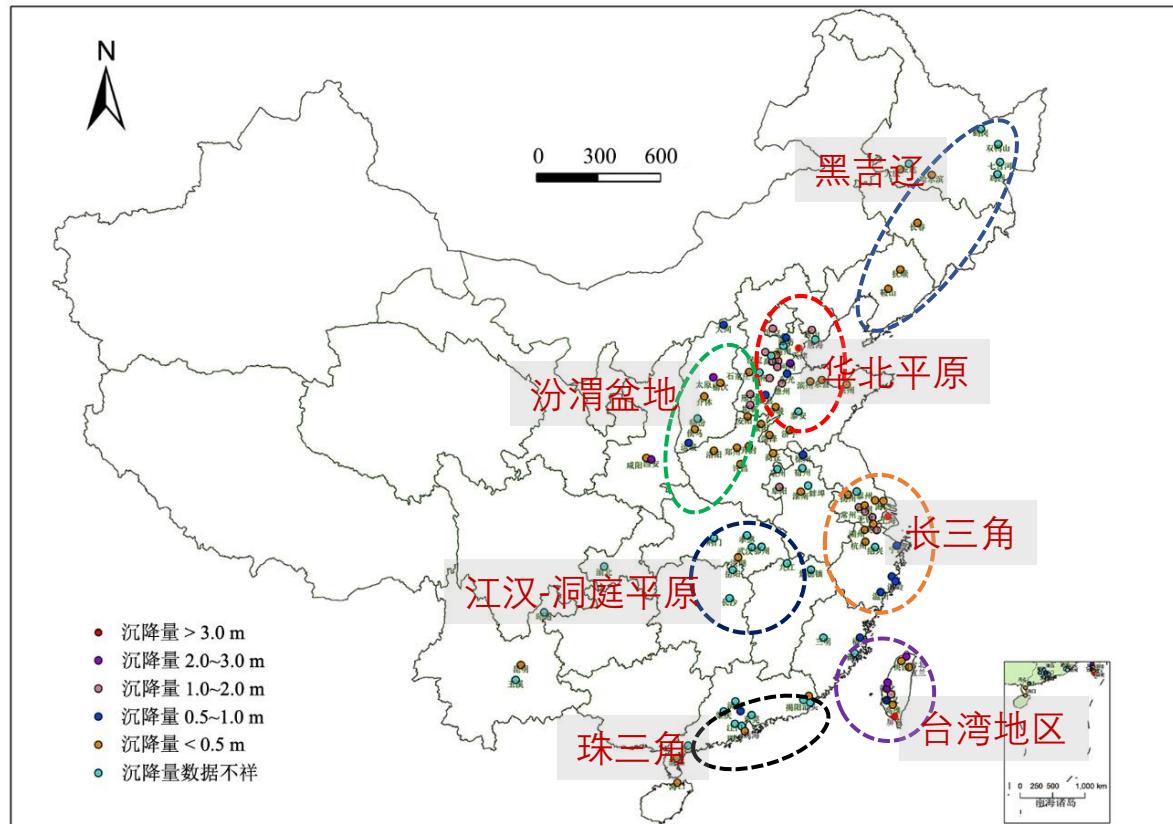
全球性、综合性、多学科交叉的复杂系统问题

地面沉降已是全球性的地质环境问题



国内地面沉降问题不容小觑

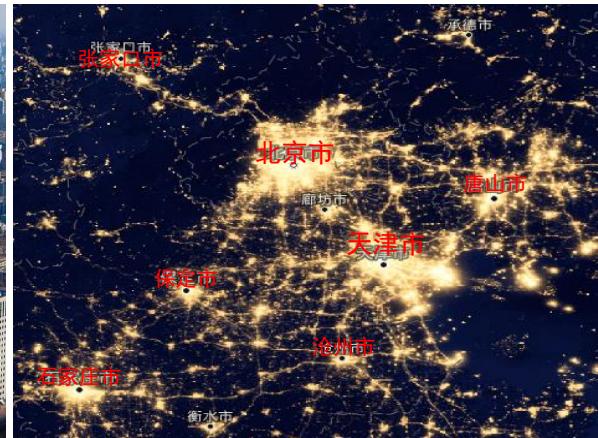
- 全国22个省份、超过110个城市发生了地面沉降，主要分布在如下图七个区域：



全国地面沉降分布（据“全国城市地面沉降现状统计表”绘制）

研究的必要性

- 京津冀地区高密度城市集群、高强度地下水超量开采、高速一体化交通网络。
- 2017年京津冀地面沉降速率超过50mm/a的面积为1.39万km²，全国占比约94%；其中北京地区为770km²，最大沉降速率157mm/a，最大累计沉降1864 mm。
- 京津冀平原区地下水可开采资源量146亿立方米/年，多年平均开采量164亿立方米，超采约18亿立方米/年。其中，100米以下深层地下水超采严重，超采量12.7亿立方米/年，超采面积约6万平方公里。
- 京津冀一体化、南水北调背景下，亟待揭示区域沉降演变规律，实现科学调控，促进区域发展，保障区域安全。



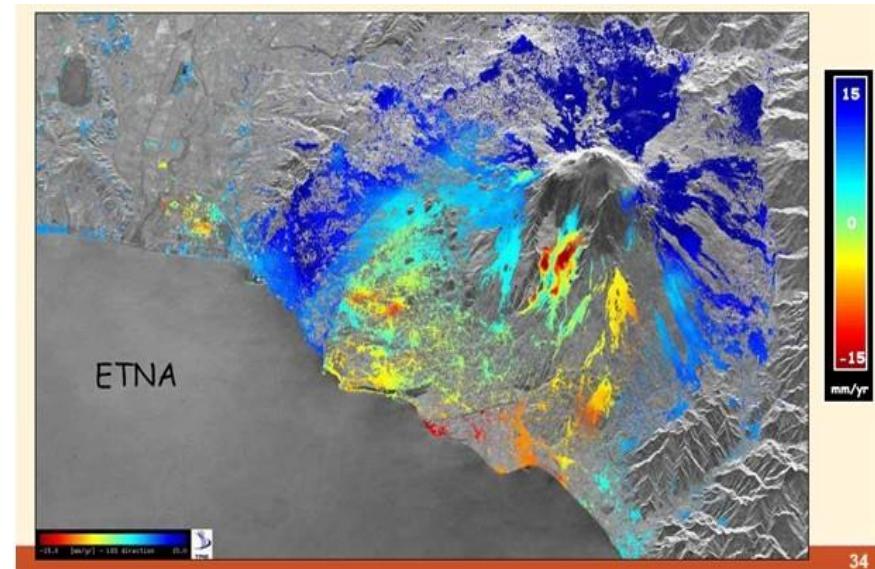
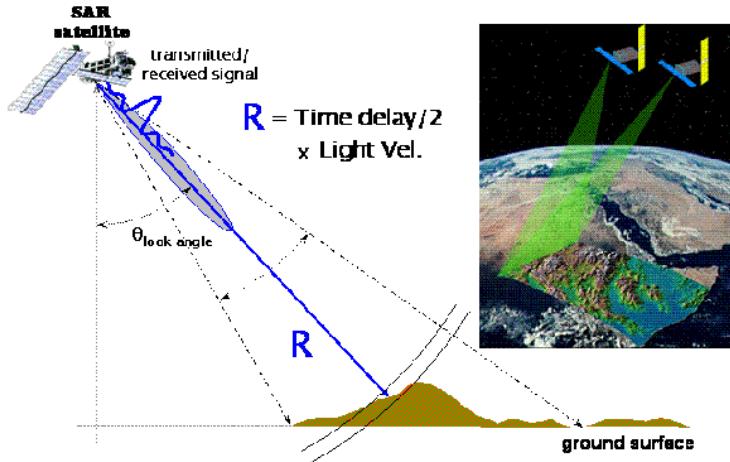


汇报提纲

- 一、背景介绍
- 二、InSAR技术概述
- 三、关键技术——MT-InSAR
- 四、北京地面沉降演化特征
- 五、地面沉降与地下水关联特征
- 六、案例展示

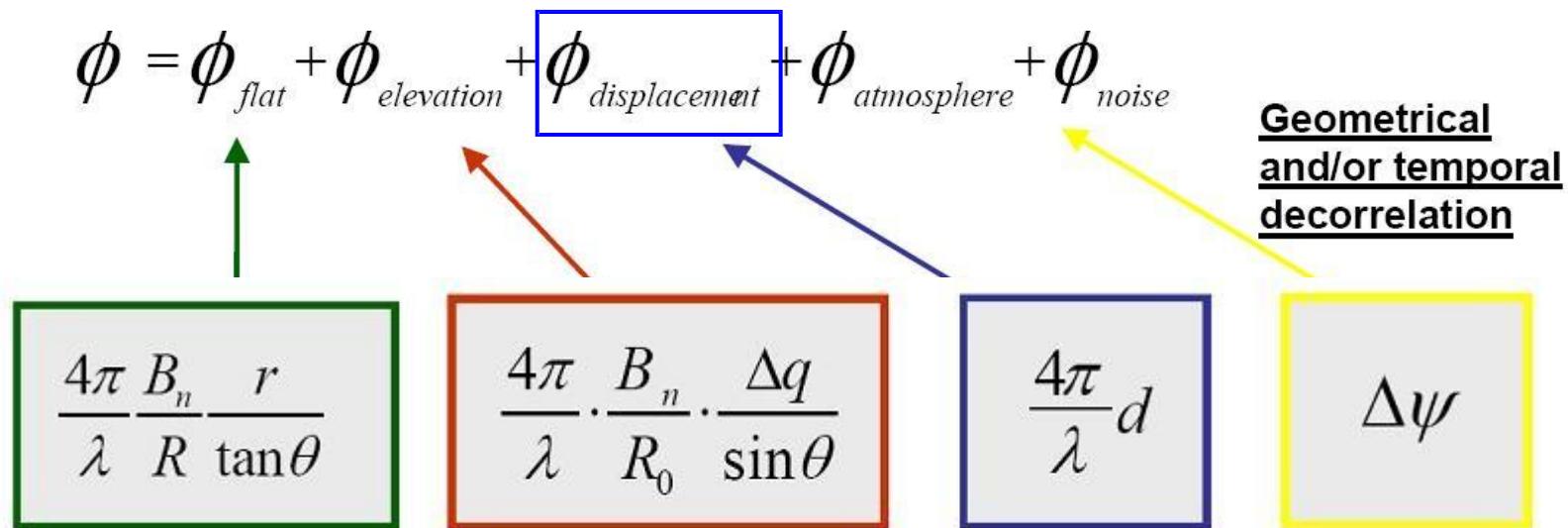
2.1 InSAR技术

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, 简称InSAR) 是利用雷达成像传感器获取被测对象具有相干性的复数图像信息，并通过配准、基线估计、干涉处理、相位解缠等处理，由干涉相位反演地形信息（或者形变信息）的理论和技术。



2.1 InSAR技术

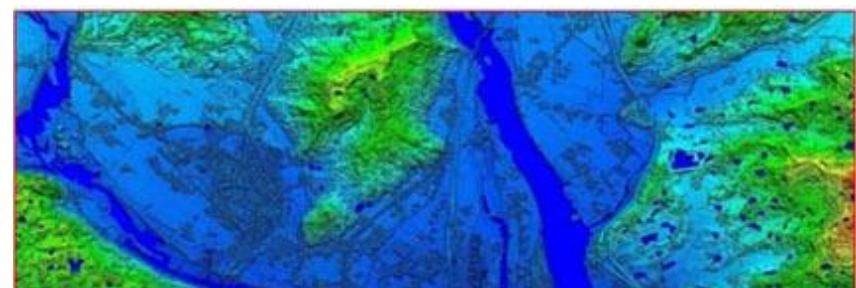
干涉相位的组成：



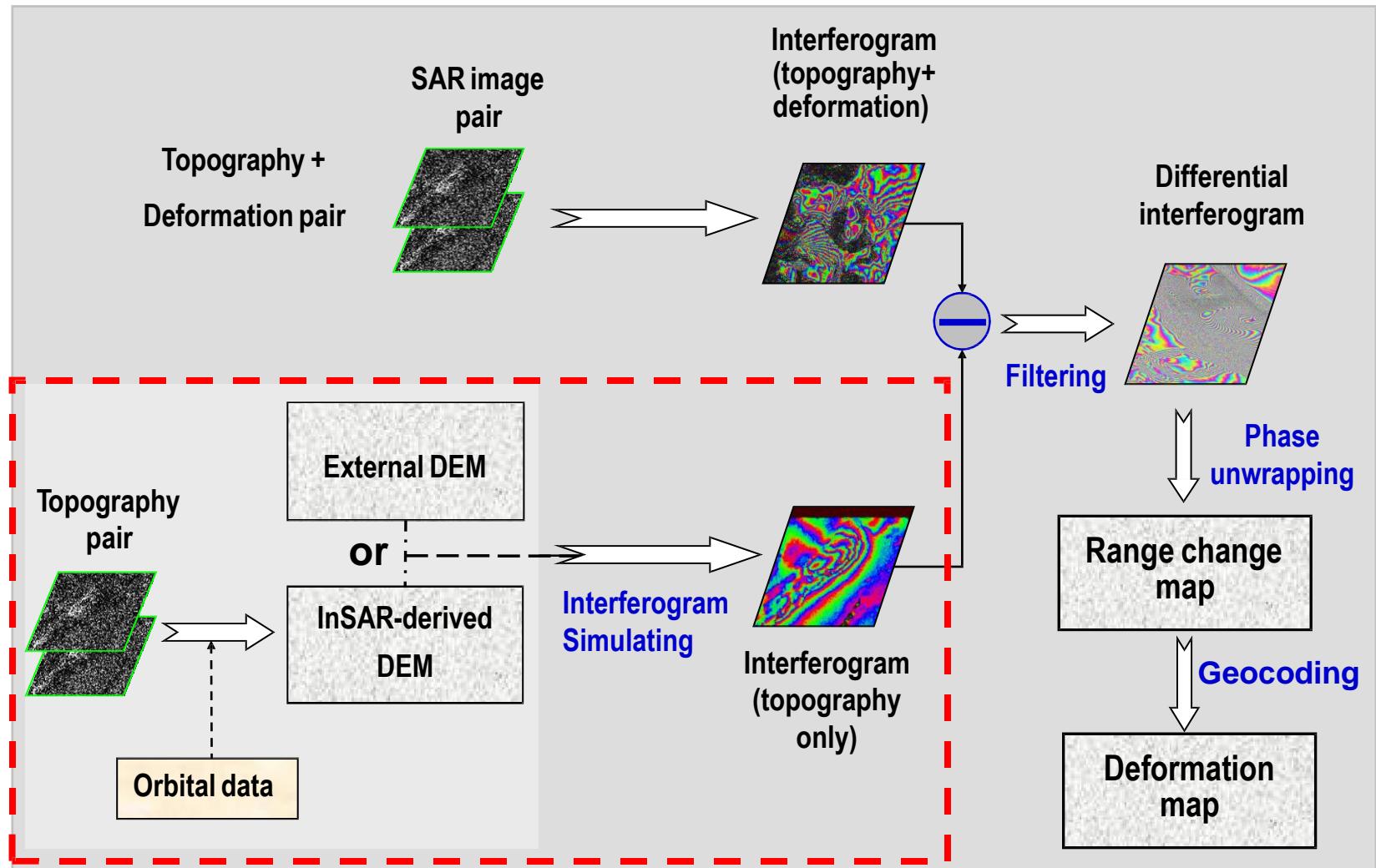
其中，
 B_n — 空间基线； r — 水平距离； θ — 入射角； Δq — 高程值
 R 、 R_0 — 卫星到地面目标的距离； λ — 波长； d — 形变量.

2.2 D-InSAR技术

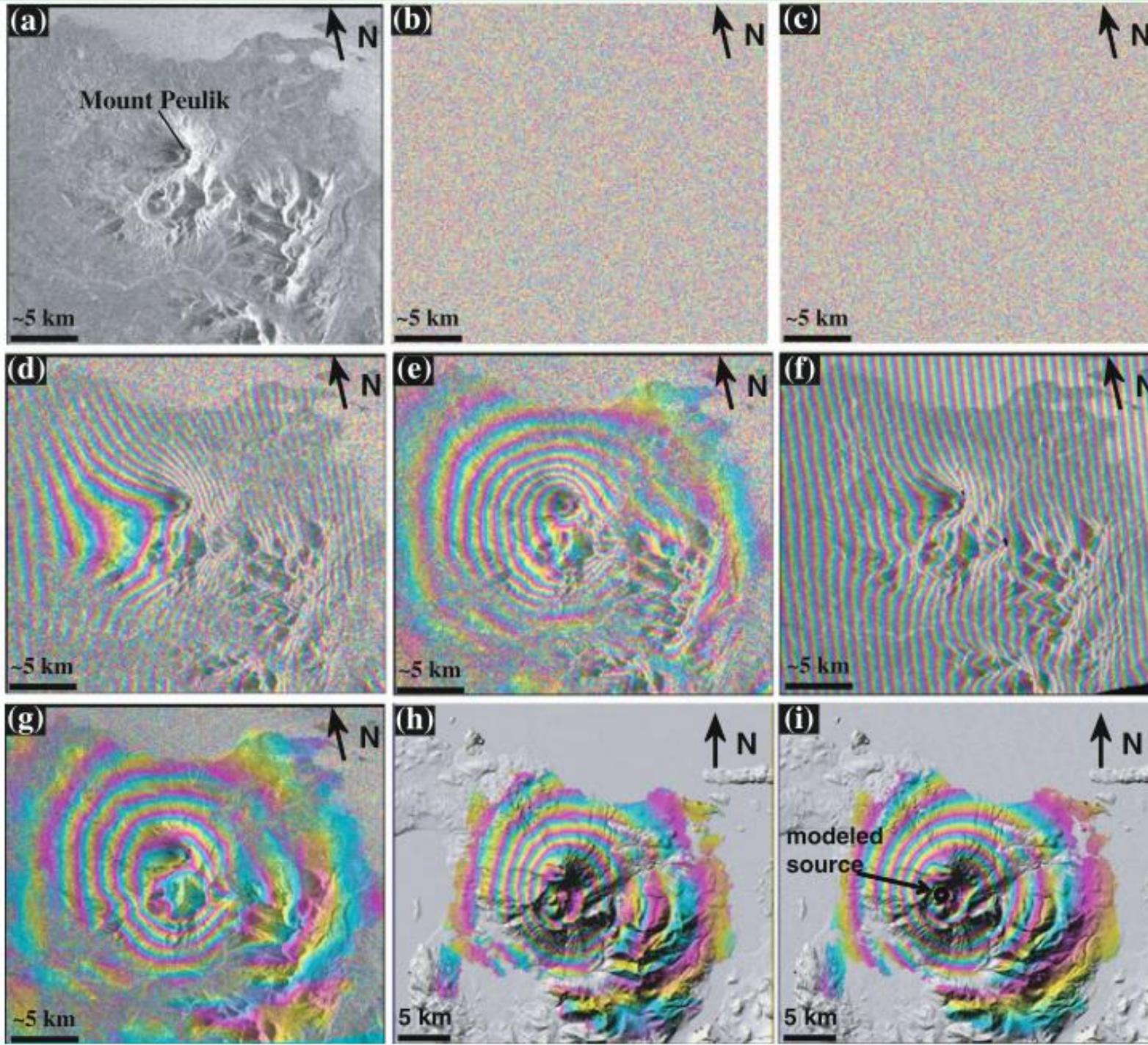
D-InSAR（**Different InSAR**，差分干涉）技术是在InSAR的基础上发展起来的，从干涉结果（包含目标区域地形和形变等信息）中去进一步去除地形信息，从而得到地面目标**毫米级**形变信息的技术。D-InSAR具有**高形变敏感度**、**高空间分辨率**等突出的技术优势，是一种**基于面观测**的空间大地测量新技术，可补充已有的基于点观测的**低空间分辨率**大地测量技术（如GPS、甚长基线干涉和精密水准等）。



D-InSAR一般处理流程

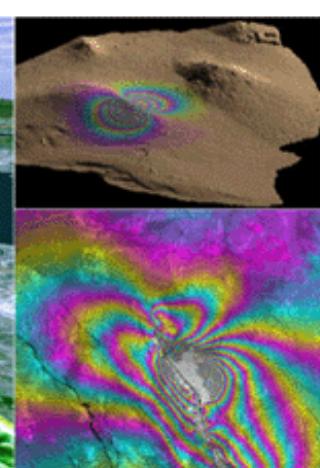
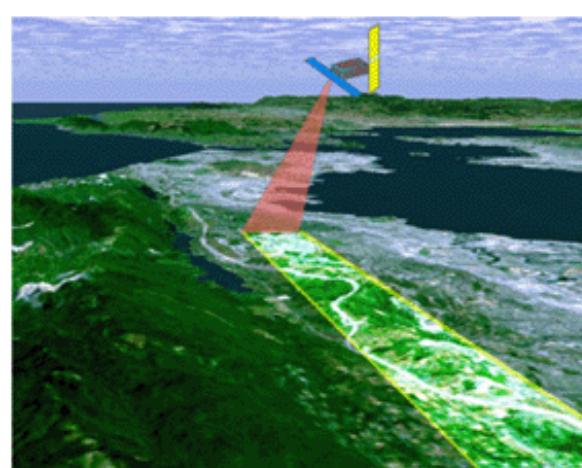
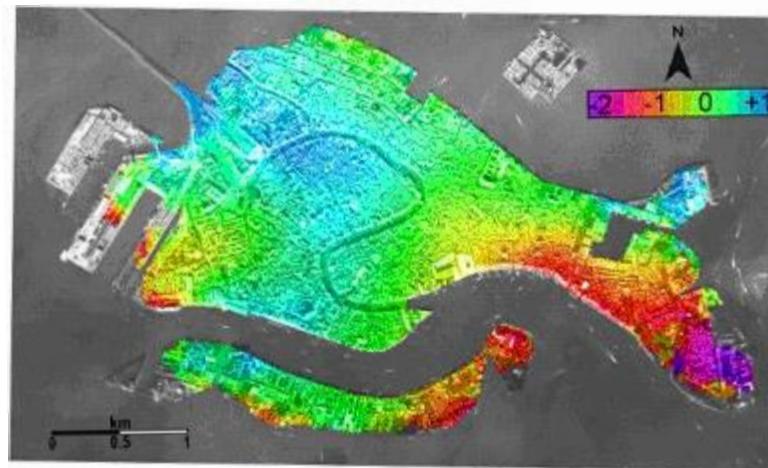


图展示了D-InSAR技术的主要流程



InSAR技术特点

- 全天时（能够根据自己的需求发射电磁波）
- 全天候（波长短、穿透能力强）
- 高精度
- 连续空间覆盖
- 大区域、面状观测



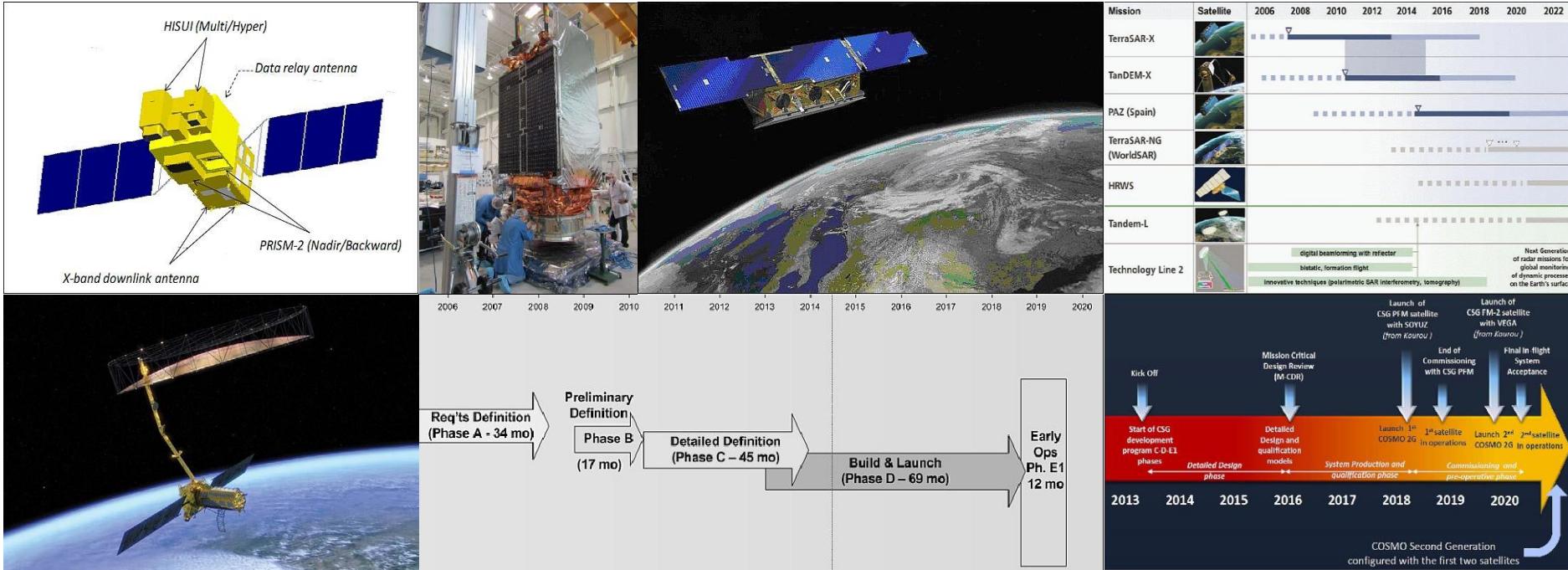


典型星载SAR卫星系统

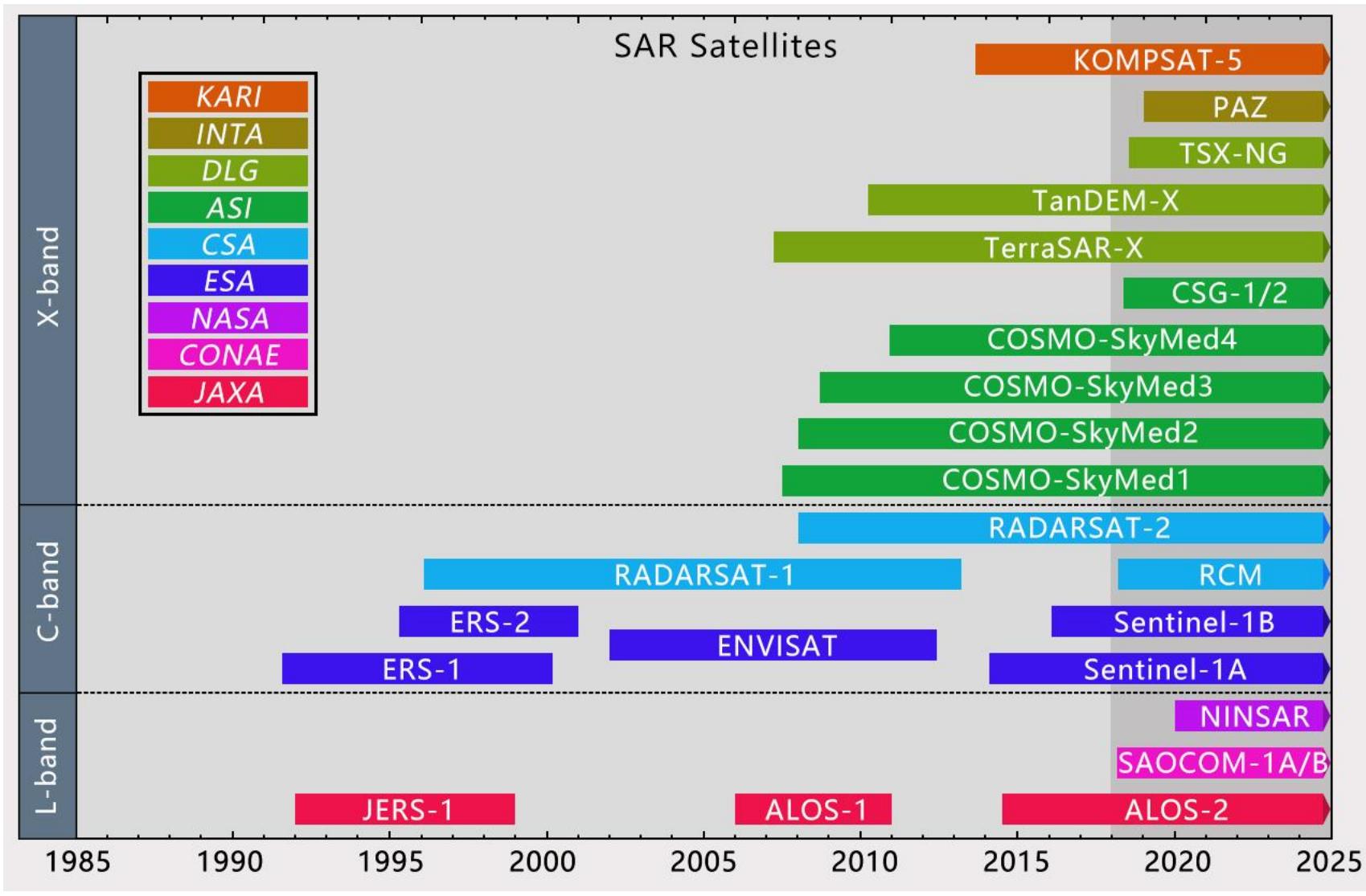
卫星SAR系统	发射年份	轨道高度 (km)	波段/波长 (cm)	侧视角 (度)	重复周期 (天)	地面分辨率 (m)	影像幅宽 (km)
ERS-1/2	1: 1992	790	C/5.6	23	35	25	100
	2: 1995						
JERS-1	1992	568	L/23.5	38	44	25	800
RADARSAT-1	1995	790	C/5.6	23-65	24	8-30	50-500
ENVISAT ASAR	2002	800	C/5.6	15-45	35	25-100	100-405
ALOS	2006	700	L/23.5	8-60	46	10-100	20-350
RADARSAT-2	2007	798	C/5.6	10-49	25	3-100	25-500
TerraSAR-X	2007	514	X/3.1	20-45	11	1-16	10-100
TanDEM-X	2010						
COSMO-SkyMed	2007-2010	620	X/3.1	20-60	4-16	1-100	10-200
Sentinel-1	2014	693	C/5.6	20-45	6-12	5-20	80-400

全球主要SAR卫星发射计划

- TerrSAR-NG (Next Generation), 2018~2020
- CSG (COSMO-SkyMed Second Generation) Constellation, 2018~2019
- RCM (RADARSAT Constellation Mission), 2018
- ALOS-3 (Advanced Land Observing Satellite-3), 2019



目前在轨SAR卫星



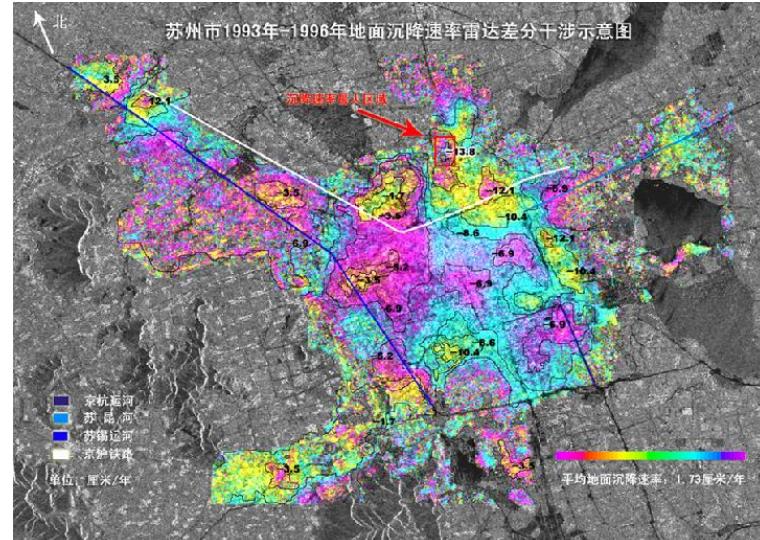


国际监测研究计划-InSAR

- 星载合成孔径雷达应用, 合成孔径雷达联合研究工作组, 1996——
- 星载合成孔径雷达: 目前地位及今后发展方向, 地球空间科学委员会, NASA, 1995——
- 生活在多灾害的星球上, 固体地球科学工作组, 2002——
- 全球环境安全监测 (GMES), 欧洲委员会和欧洲太空总署, 2003——
- 龙计划, 中国政府-欧洲空间局, 2004——
- 美国综合地球观测系统的战略计划 地球观测工作组, 环境与自然资源委员会, 2004——
- 全球综合地球观测系统 (GEOSS) 10年执行计划, 地球观测组织执行计划工作组 (GEO), 2004——
- Tandem-X计划, 第二颗TerraSAR-X卫星, DLR, 2010——
- 哨兵计划-1A (Sentinel-1A), 欧洲航天局, 2012——
-

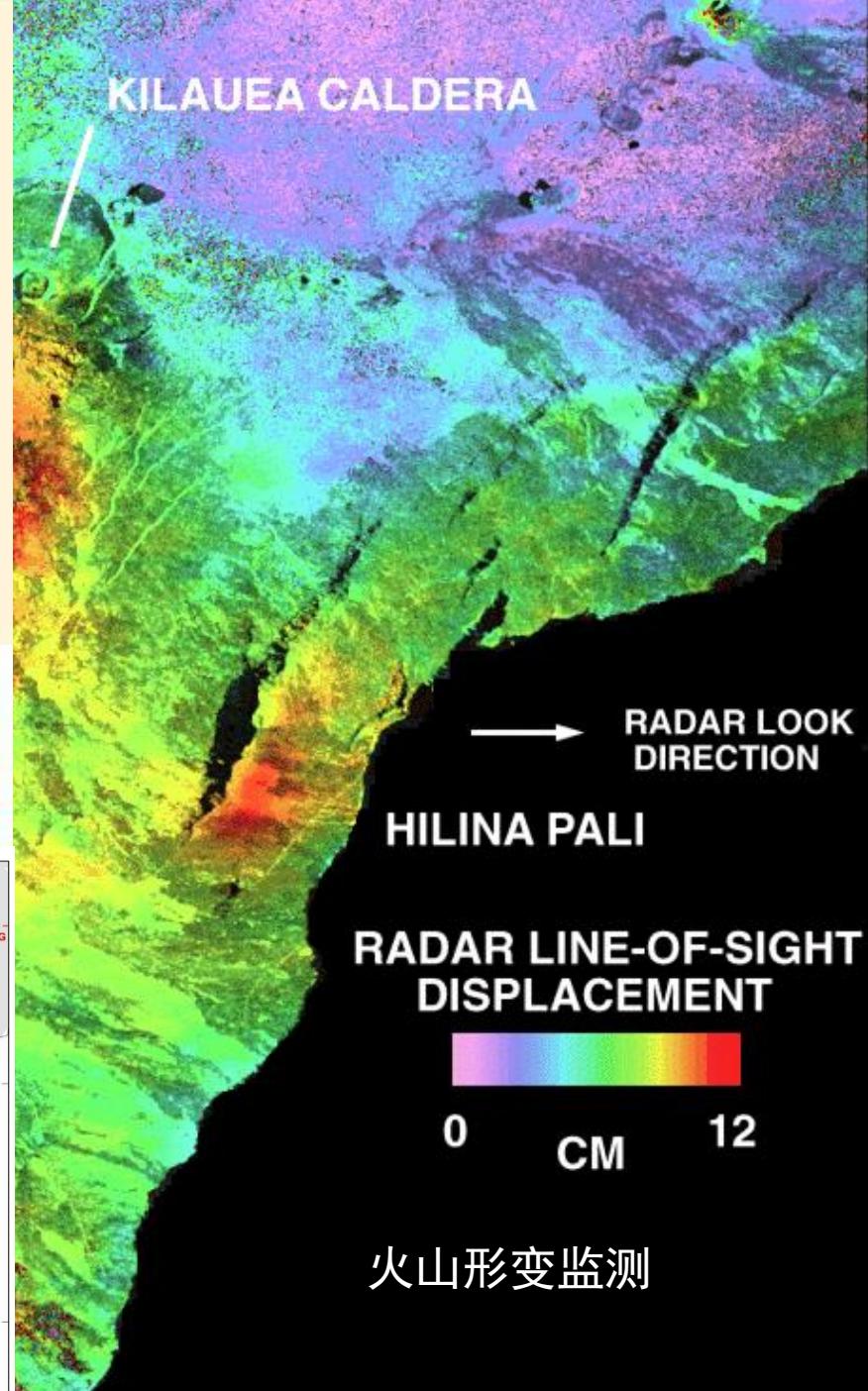
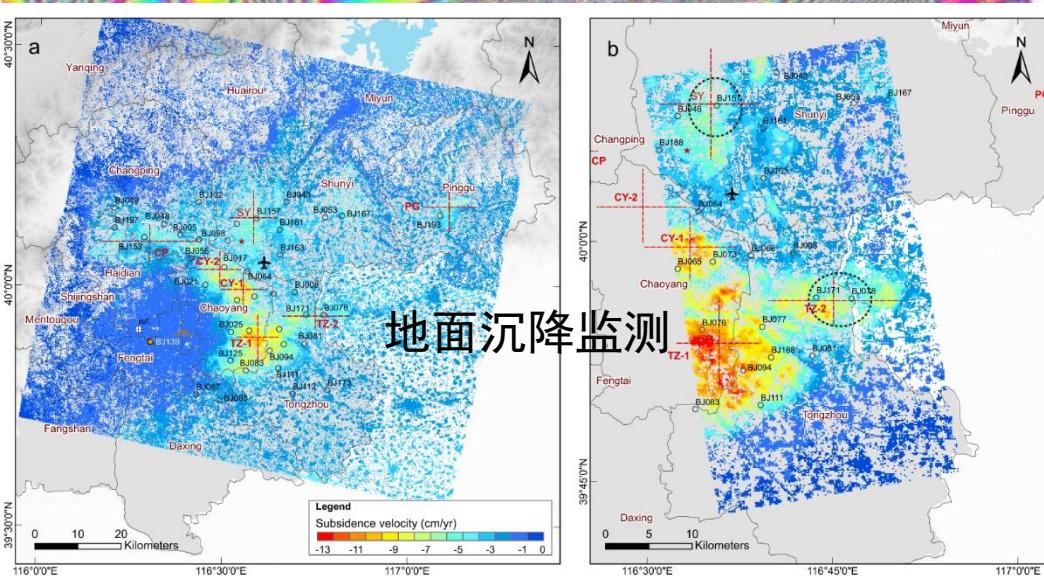
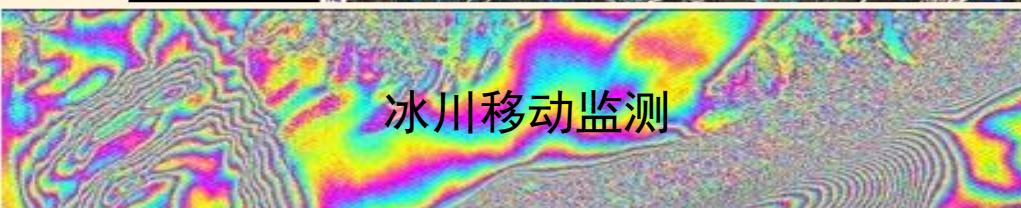
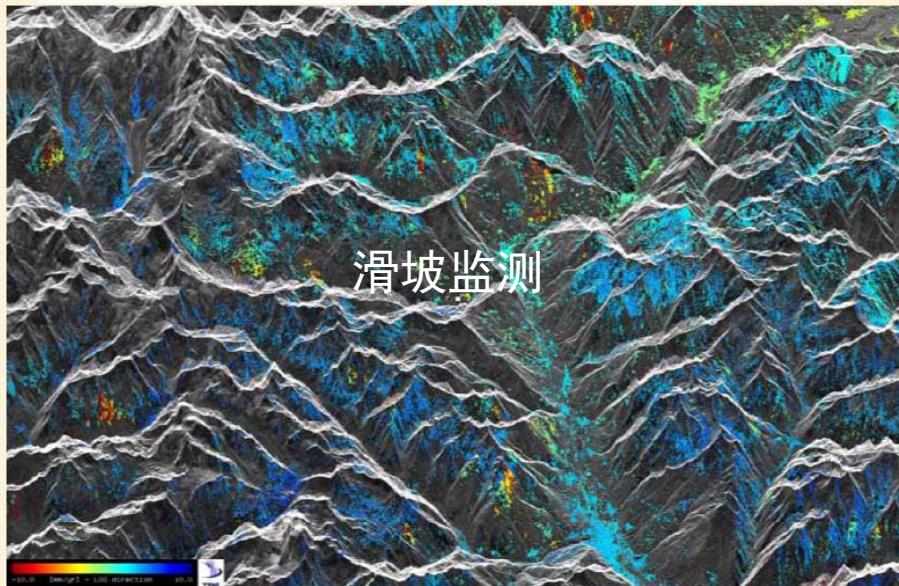
InSAR技术在地学研究中的应用

雷达干涉测量技术根据是否去除地形信息可分为InSAR和D-InSAR两种。其中，InSAR主要应用于地形测量，如建立DEM（著名的SRTM计划）；D-InSAR用于获得毫米级的高精度地表形变，如DEM修测与精化、地壳形变、地面沉降、滑坡、火山变形和冰川移动等较大面积形变的测量。



Identifying landslides in Piedmont

Landslides detection and monitoring





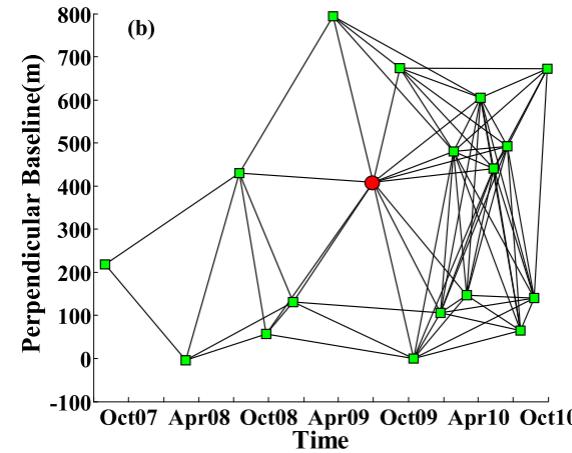
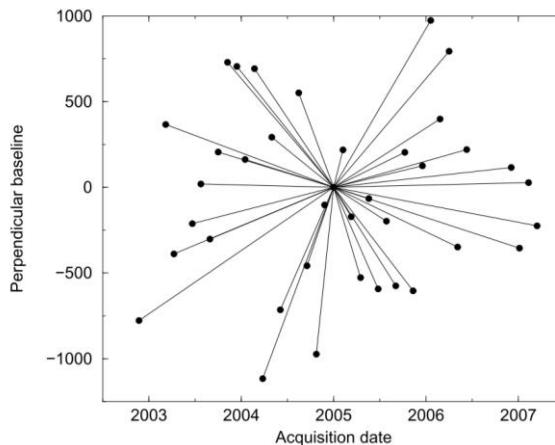
汇报提纲

- 一、背景介绍**
- 二、InSAR技术概述**
- 三、关键技术——MT-InSAR**
- 四、北京地面沉降演化特征**
- 五、地面沉降与地下水关联特征**
- 六、案例展示**

3.1 MT-InSAR技术

MT-InSAR (Multi-temporal InSAR)技术是常规 InSAR 技术的进一步发展。时序 InSAR 技术的提出主要是为了解决长时间序列SAR干涉分析过程中，干涉相位的轨道误差、大气延迟、地形误差等因素造成的低相干性问题。当前MT-InSAR 技术主要分为以下三类：

- 相位叠加技术 (Stacking)
- 永久散射体技术 (PS-InSAR) -Feretti et al., 2000
- 小基线集技术 (SBAS) -Berardino et al., 2002





INSAR技术方法研究现状

- 方位向偏移（AZO）, Rémi Michel etc., 1999
- PS- DInSAR, Ferretti A , etc., 1999
- DInSAR + AZO, Yuri Fialko etc., 1999
- 相干目标法, Usai, etc., 2001
- 升、降轨SAR, Mikio Tohita etc., 2001
- 小基线集, Berardino etc., 2002
- 多图像几何视角InSAR, Tim J. Wright etc., 2004
- DInSAR+MAI, Noa etc., 2006
- 高分辨率INSAR, TerraSAR-X、CosmoSkyMed , 2007
- TCP-InSAR, Lei Zhang etc., 2011
- PSIG, Devanthéry N etc., 2014
- Tomo-PSInSAR, MA Peifeng etc., 2016

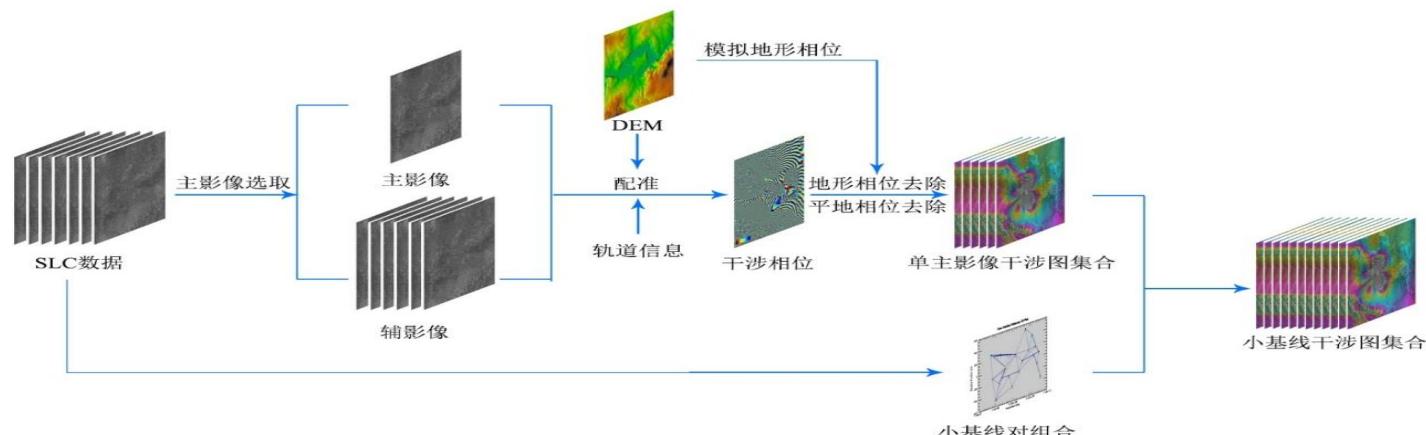
相关技术方法: INSAR应用中去大气影响、SAR层析成像（SAR Tomography）、新技术方法组合应用……

3.1 MT-InSAR技术

对干涉图中的任意像元 $x (r, c)$ ， r 、 c 分别为该点在方位—斜距坐标系中的坐标，该点的相位可以表示为：

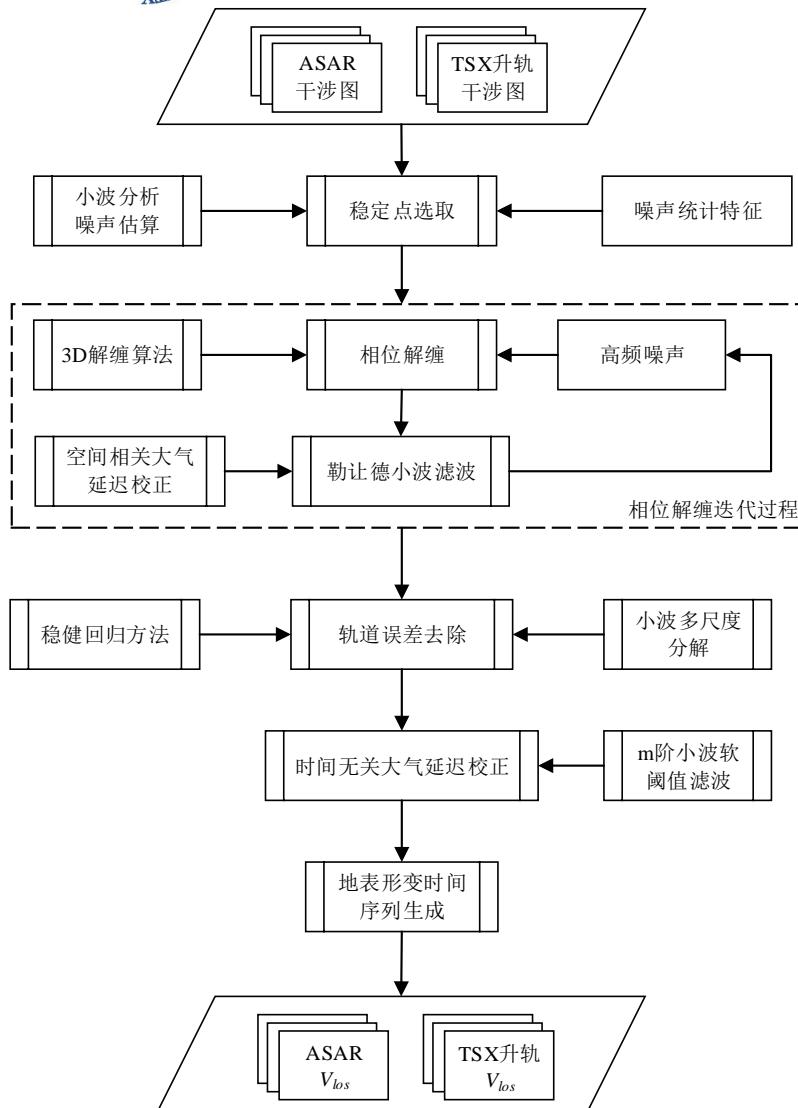
$$\delta\varphi(x) = \delta\varphi_{def}(x) + \delta\varphi_{orb}(x) + \delta\varphi_{topo}(x) + \delta\varphi_{atm}(x) + \delta\varphi_{noise}(x)$$

其中， $\delta\varphi_{def}$ 为地表形变的相位贡献， $\delta\varphi_{orb}$ 为轨道误差的相位贡献， $\delta\varphi_{topo}$ 为DEM误差相位贡献， $\delta\varphi_{atm}$ 为大气延迟误差相位贡献， $\delta\varphi_{noise}$ 为背景散射、热噪声和失相干噪声等成分的相位贡献。



常规小基线集（SBAS）干涉对生成技术流程

3.2 WB-SBAS技术



WB-SBAS时序处理技术流程

WB-SBAS 技术基于多主影像、短基线干涉结果。与常规SBAS方法相比，其时间序列分析的先进性主要体现在以下几个方面：

- 1) 新的统计方法检查干涉相位噪声，以鉴别稳定像元（低噪像元）；
- 2) 组建多个小波滤波器用于去除 DEM 误差、轨道误差以及大气延迟的影响；
- 3) 勒让德小波进行迭代解缠并去除空间失相干噪声。



3.3 多平台、多时段时间序列融合方法

对于观测时间有重叠的形变时间序列，要融合两个时间序列集，关键需要确定第二个时间序列的首个时间节点的形变值。

□ 通过时间重叠区形变数据建立线性方程组

$$\tilde{H} \equiv \left[\tilde{H}_0, \tilde{H}_1, \dots, \tilde{H}_{N^{(1)}+N^{(2)}-1} \right]^T$$

$$\tilde{T} = \bigcup_{i=1,2} t^{(i)} \equiv \left[\tilde{T}_0, \tilde{T}_1, \dots, \tilde{T}_{N^{(1)}+N^{(2)}-1} \right]^T$$

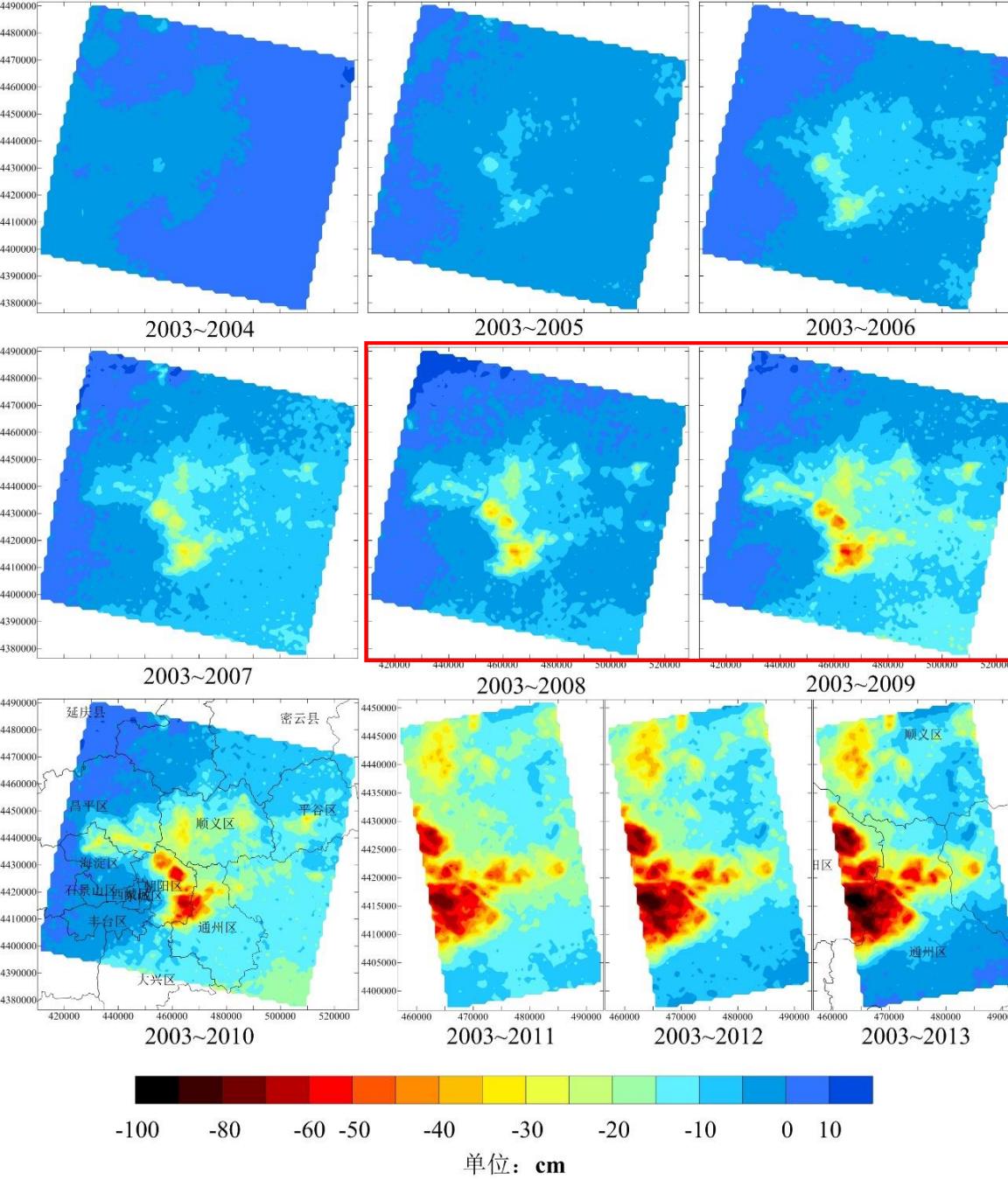
□ 奇异值分解求时间序列线性方程组

$$A = U \Sigma V^T \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \quad \tilde{H}^{(2)} = \tilde{H}(\tau) \Big|_{\tau=t_0^{(2)}}$$

□ 误差订正（频率分布函数等）

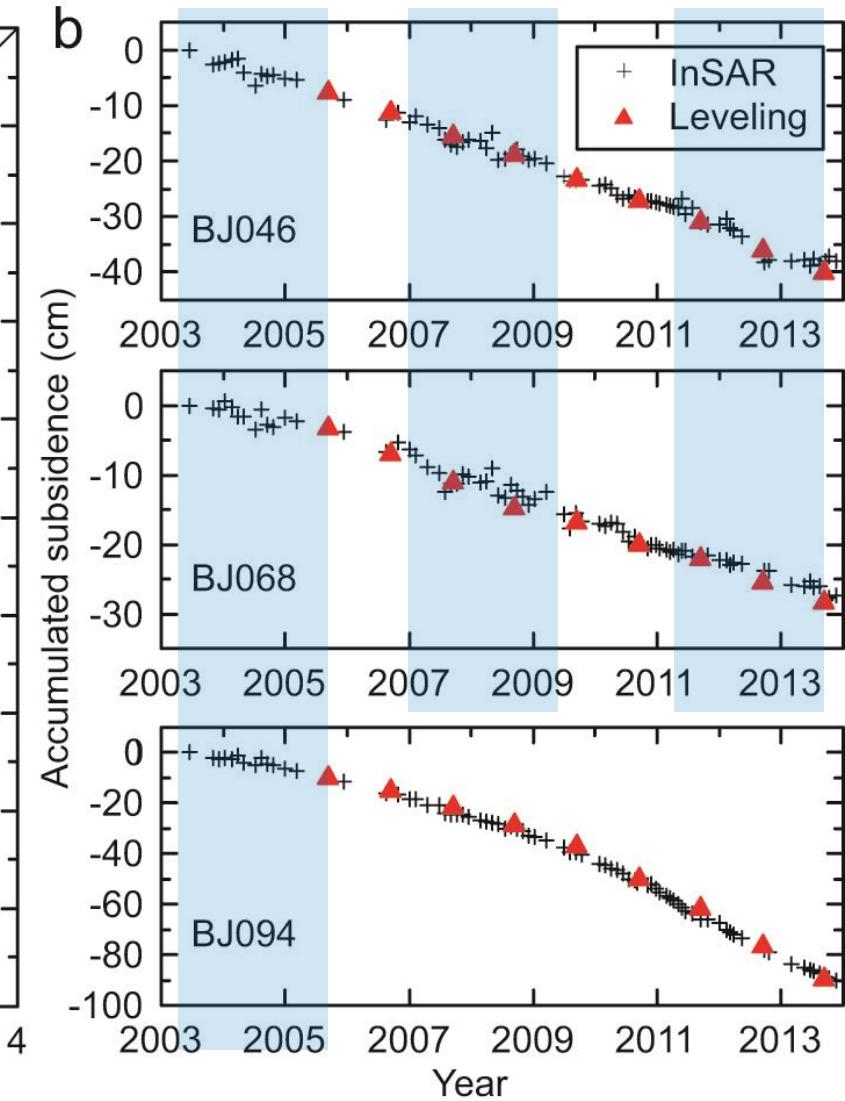
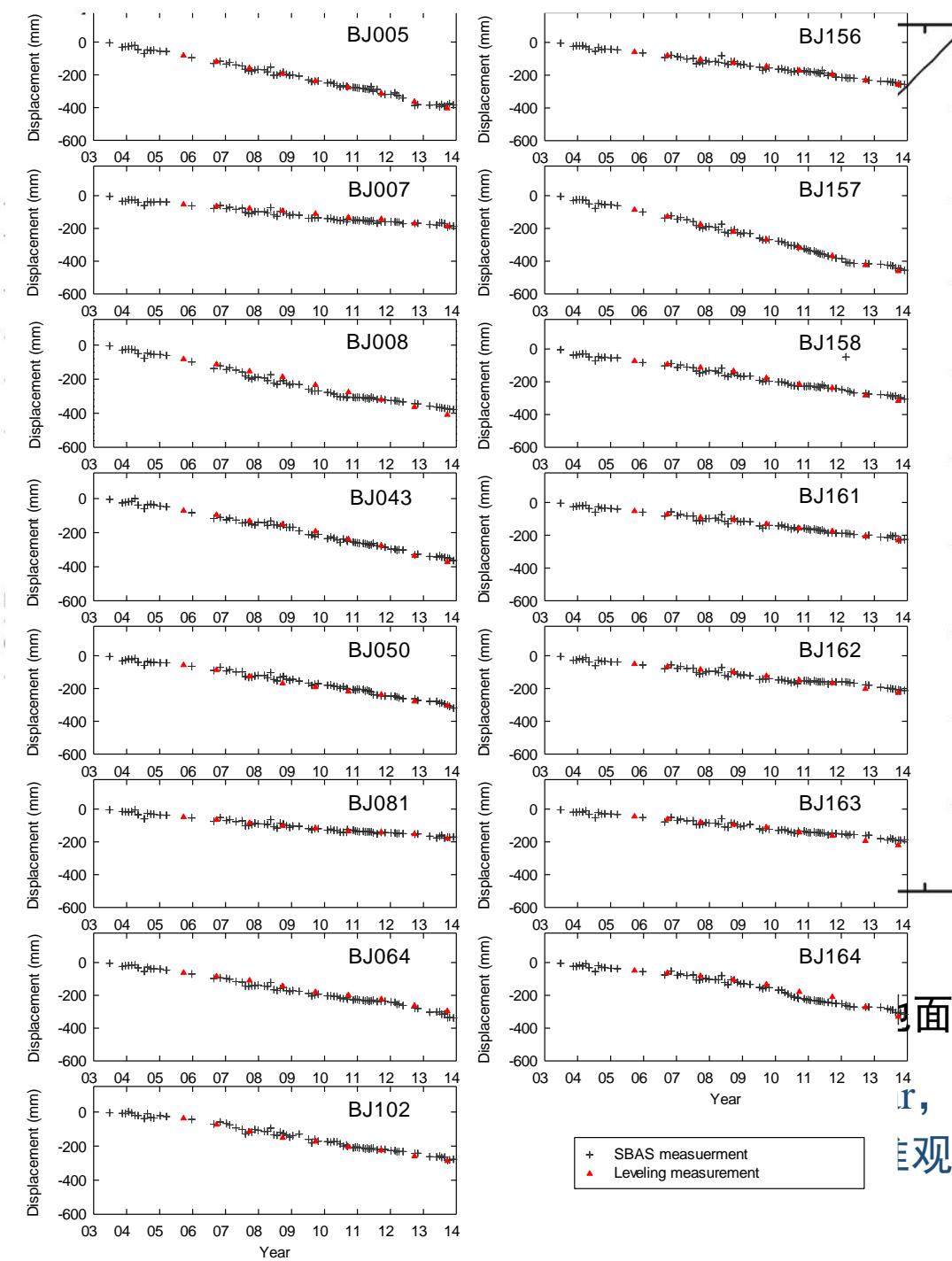
解决不同平台间观测几何差异、参考点及样本点不一致的问题。

地面沉降监测结果



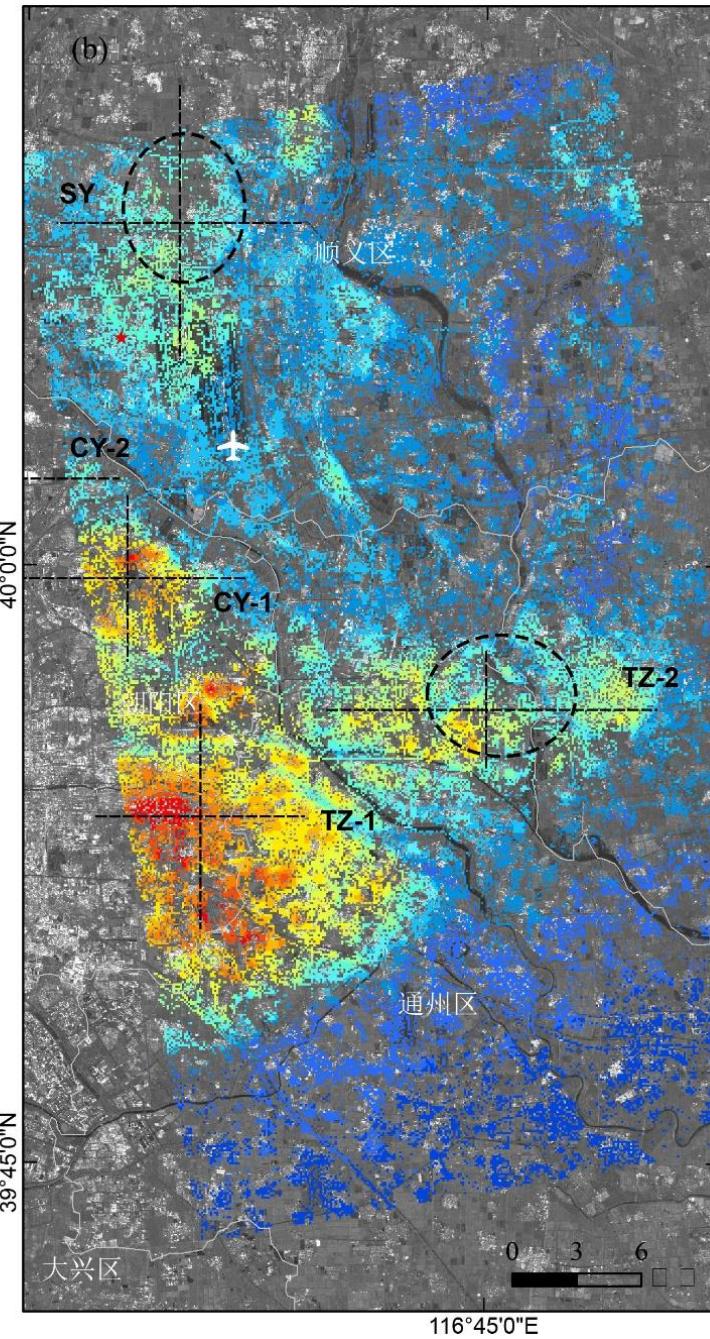
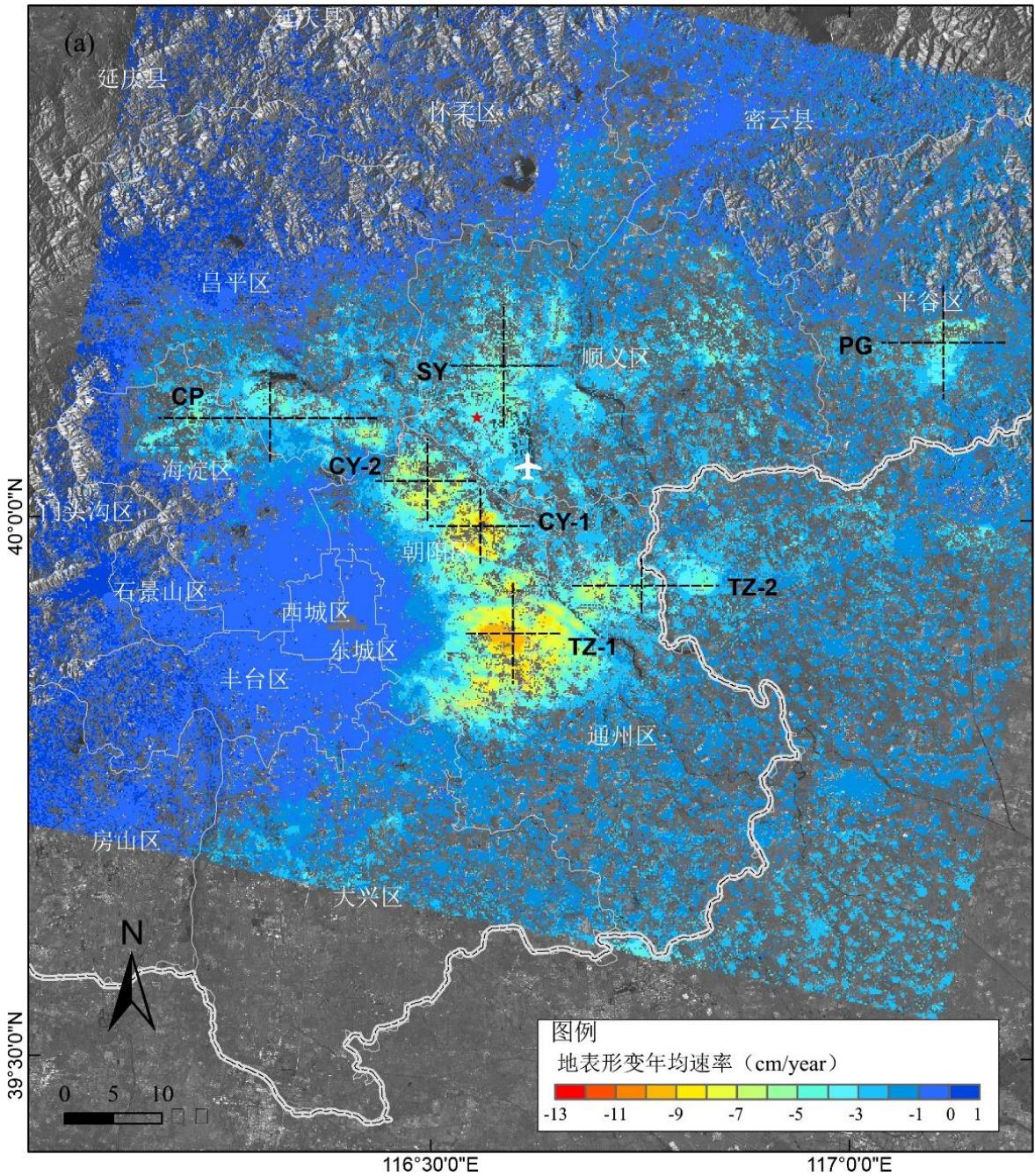
2003~2013年北京平原区地面沉降分布时变图

- 2003~2010年间, 北京平原区地面累计沉降最大值为690.6 mm, 标准差为162.9 mm, 空间分布严重不均。
- 2003~2013年TSX数据集覆盖区域地面累计沉降量最大值为1006.5 mm, 标准差为217.9 mm, 空间不均匀程度进一步加剧。
- 地面沉降范围逐年扩大、沉降量逐年增加, 空间分布不均匀程度逐渐加剧。



地面水准观测结果对比检验
r, 标准差小于6 mm/year, 相关系数达到
观测结果具有同样的发展趋势。

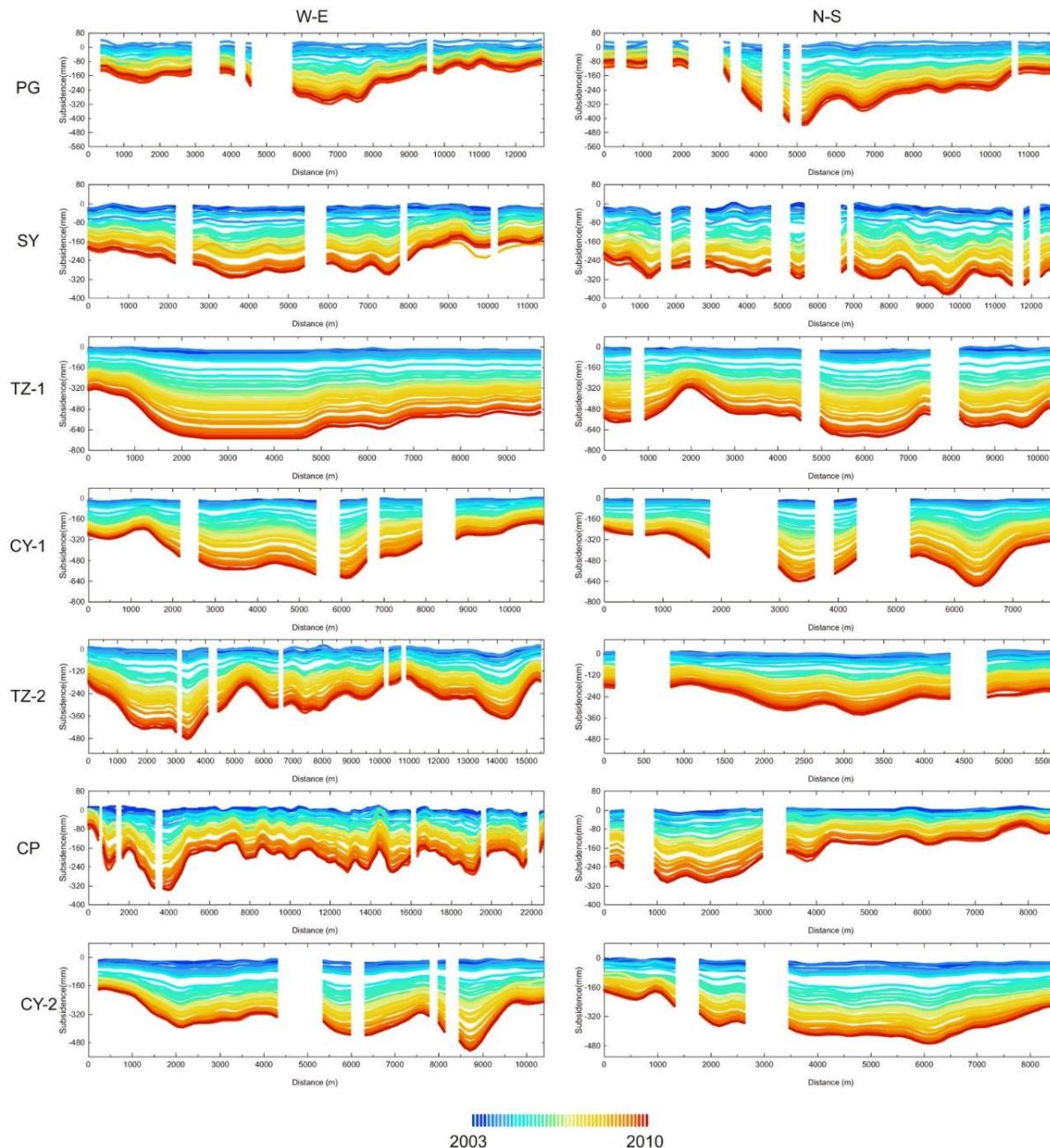
+ SBAS measurement
▲ Leveling measurement



北京平原区域地表形变速率 (a: 2003.6~2010.8; b: 2010.4~2013.11)

剖面分析

- TZ-1、TZ-2、CY-1以及CY-2剖面处地面沉降呈加剧的趋势，其中以TZ-1剖面处最为严重，累计沉降量峰值接近700 mm
- 地表形变分布差异性方面，南北向差异性略大于东西向。
- 沉降发展趋势方面，**已形成的漏斗区**（朝阳区、通州区）沉降发展趋势**较新发育漏斗区**（平谷区、顺义区）更为稳定。
- 沉降区空间展布方面，剖面线处漏斗有连成一片的趋势



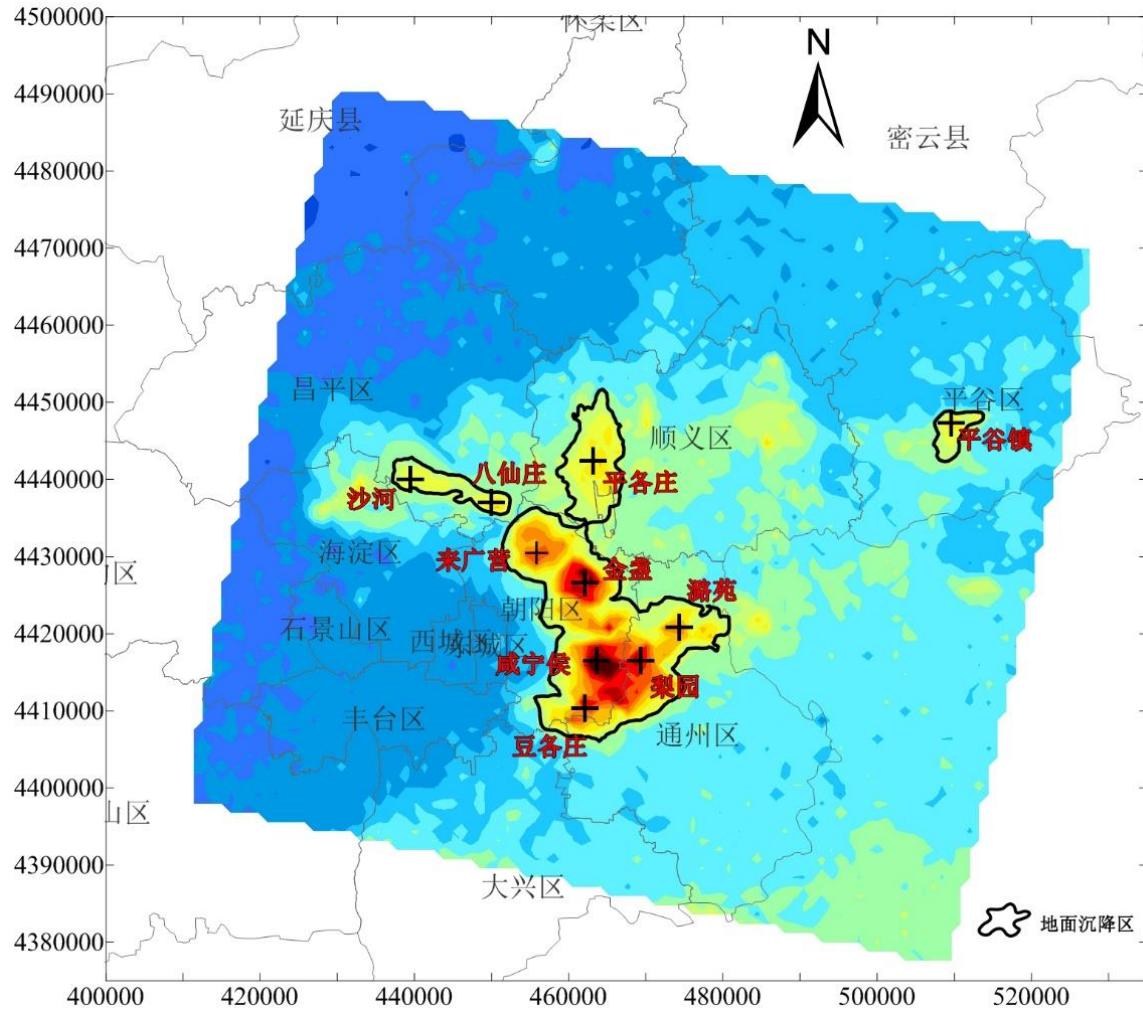
2003~2010年北京平原区地面沉降时间序列剖面



汇报提纲

- 一、背景介绍**
- 二、InSAR技术概述**
- 三、关键技术——MT-InSAR**
- 四、北京地面沉降演化特征**
- 五、地面沉降与地下水关联特征**
- 六、案例展示**

4.1 地面沉降多中心特征



□ 九个沉降区域（中心）

沙河—八仙庄沉降区

顺义平各庄沉降中心

朝阳来广营沉降中心

朝阳金盏—东坝沉降区

朝阳咸宁侯—双桥沉降区

通州梨园—台湖沉降区

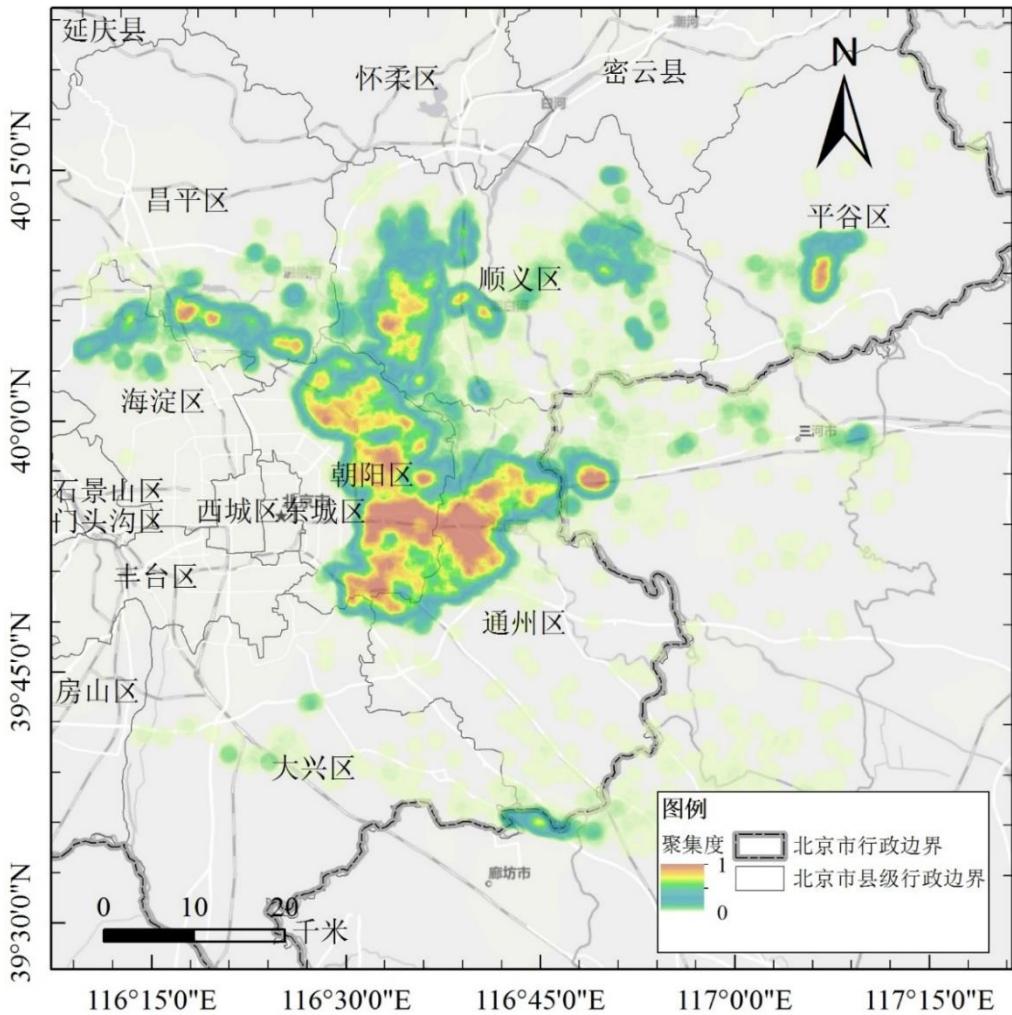
通州潞苑沉降中心

朝阳豆各庄沉降中心

平谷镇沉降中心

确定的地面沉降中心（2003~2013）

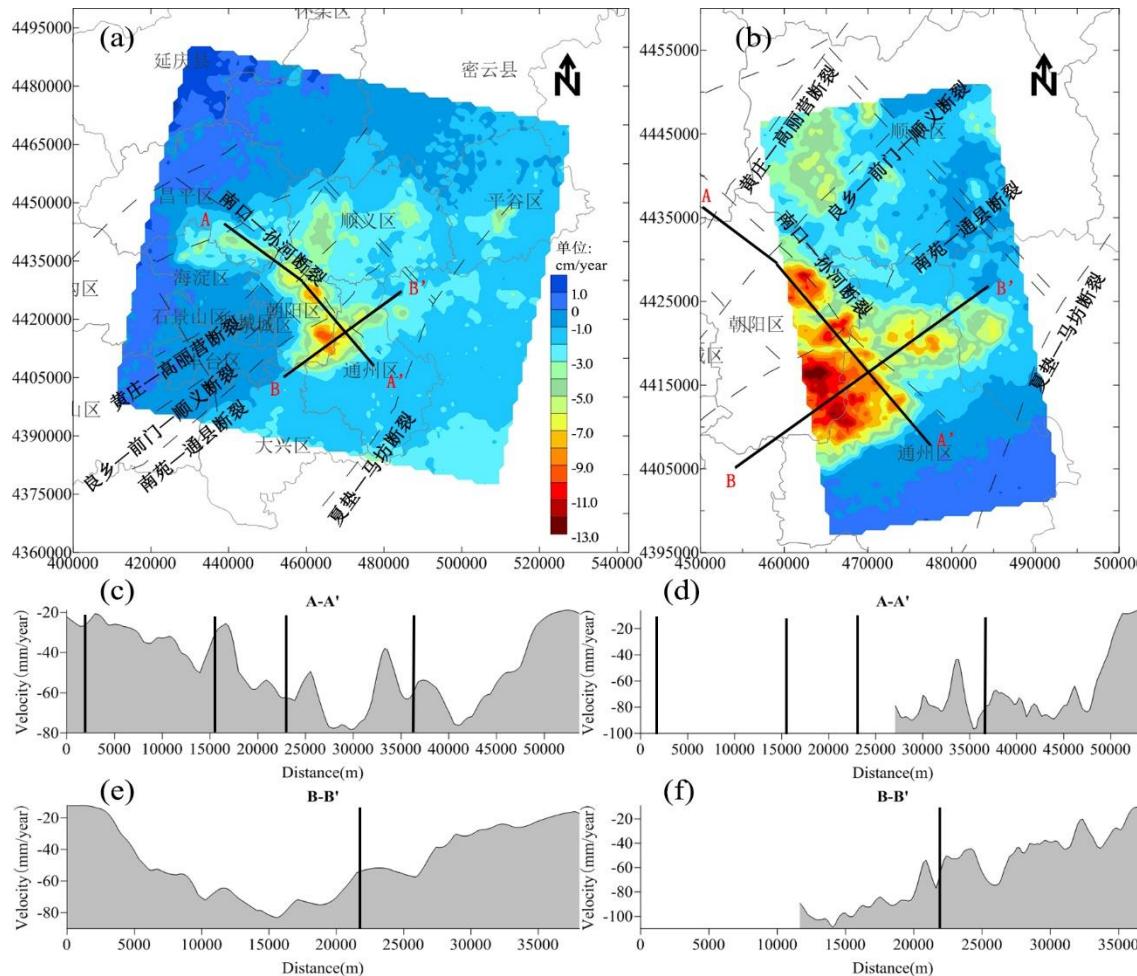
4.2 地面沉降空间聚集度特征



北京平原区地面沉降空间聚集度分布

- 空间聚集度均值为0.04，标准差为0.13，**分布极不均匀**；聚集度大于0.5的点**不足总数的3.3 %**，且**分布较集中**。
- 地面沉降空间聚集度分布与地面沉降漏斗中心的分布**高度一致**，整体空间**不均匀程度较高**。
- 针对沉降量值域的标准化处理结果，可以很好地**屏蔽非沉降区样本点的干扰**，从而直观地反映研究区地面沉降**多中心、连片特征**。

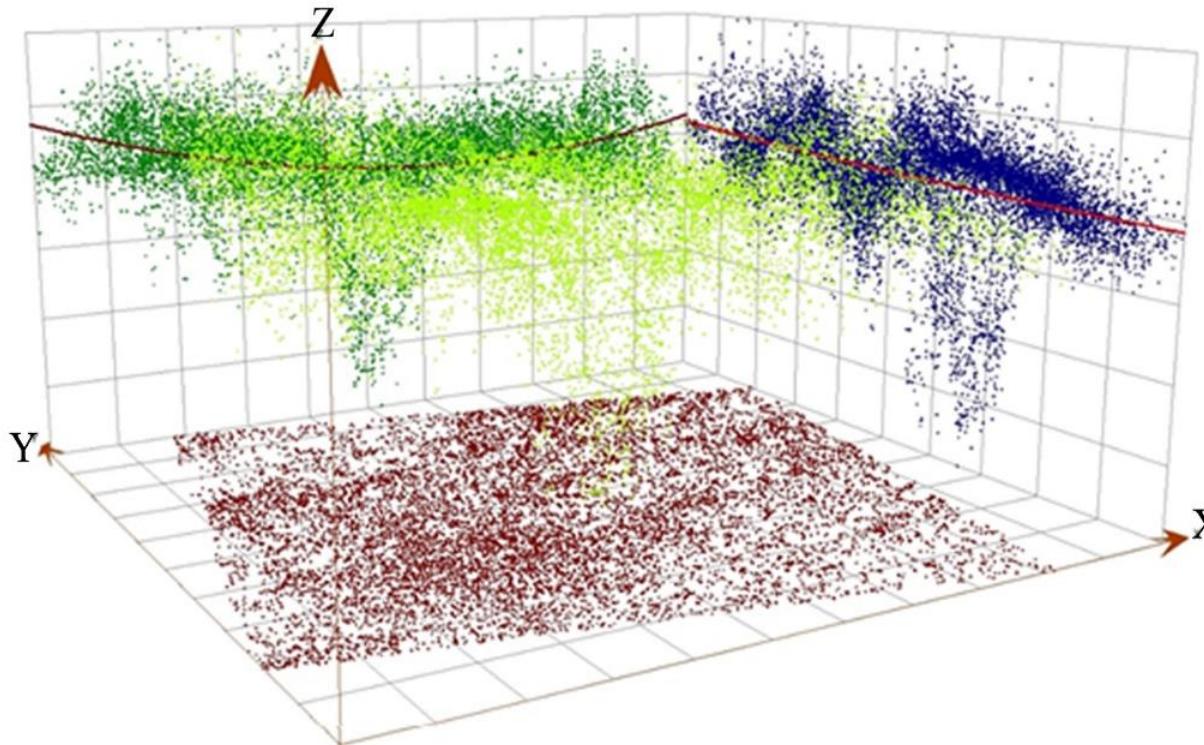
4.3 地面沉降分布与区域构造关系



北京平原区地面沉降速率及主要活动断裂分布图

- 北部沉降区主要沿着南口—孙河断裂的一侧呈带状分布
- 位于断裂两侧的地面沉降速率有明显差异，沉降中心与断裂相间分布
- 主要集中在南口—孙河断裂西南侧
- 表明区域地质构造对地面沉降的空间分布有明显的控制作用

4.4 沉降场趋势特征



- 空间场地面投影分布
- 空间场正北投影分布
- 空间场正东投影分布
- 地表形变场空间分布
- 空间场趋势面投影拟合线

基于空间统计特征的形变场趋势面分析结果图

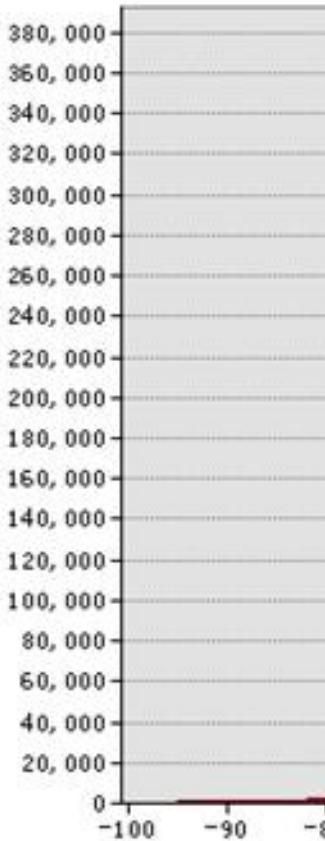
□ 优点:

趋势面逼近过程在**地理投影坐标系统**下进行，可以高度还原实际曲面的空间分布特征和趋势。

□ 缺点:

拟合方法仅提供线性拟合及逻辑拟合可选。线性拟合方法即基于普通低阶多项式的最小二乘拟合。

4.4 沉降场趋势特征



$$\hat{z}(x, y) = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 \left[c_{mn} \cos \frac{2m\pi x}{119} \cos \frac{2m\pi y}{115} + e_{mn} \sin \frac{2m\pi x}{119} \cos \frac{2m\pi y}{115} \right. \\ \left. + p_{mn} \cos \frac{2m\pi x}{119} \sin \frac{2m\pi y}{115} + w_{mn} \sin \frac{2m\pi x}{119} \sin \frac{2m\pi y}{115} \right]$$

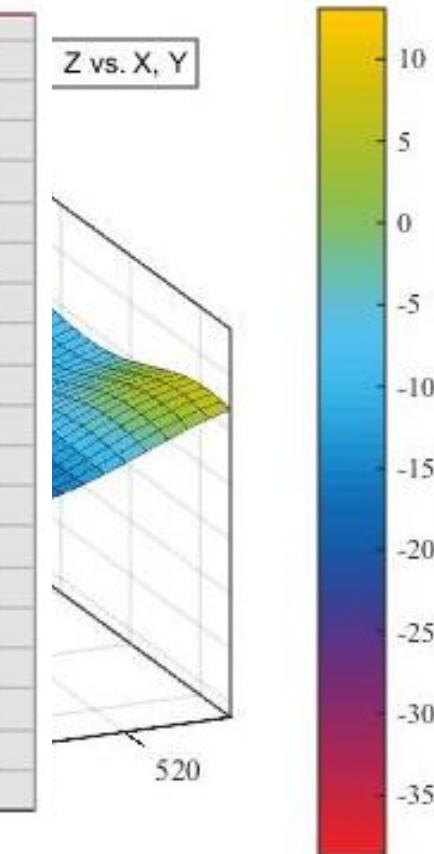
$$\begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & c_{02} \\ c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -3.51 & -5.15 & 0.62 \\ 3.79 & -3.64 & 1.29 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_{00} & e_{01} & e_{02} \\ e_{10} & e_{11} & e_{12} \\ e_{20} & e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9.74 & 6.71 & -0.17 \\ -8.75 & 4.40 & -2.47 \\ 1.78 & 2.26 & 0.86 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1.53 & -2.23 \\ 0 & -3.14 & -0.29 \\ 0 & 0.96 & 3.97 \end{bmatrix}$$

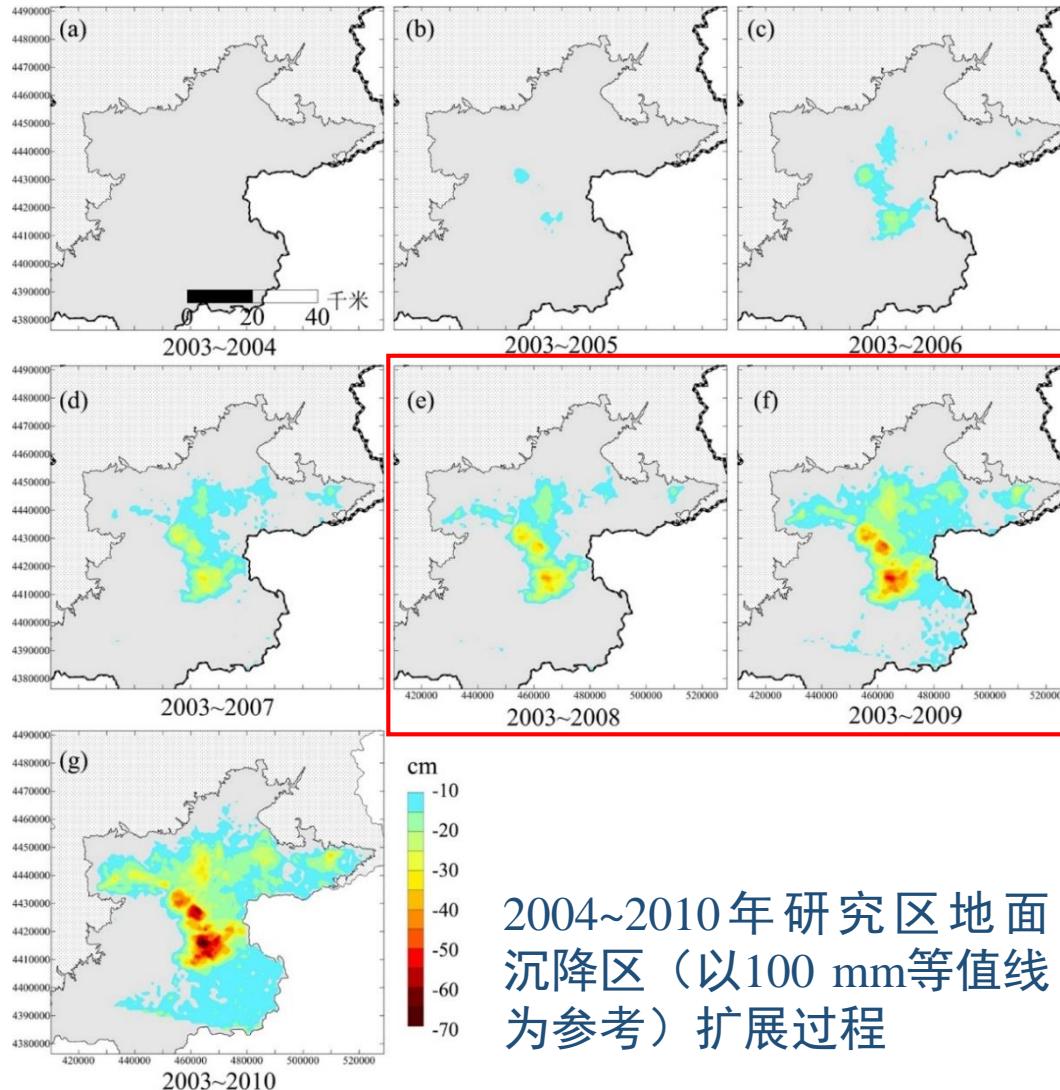
$$\begin{bmatrix} w_{00} & w_{01} & w_{02} \\ w_{10} & w_{11} & w_{12} \\ w_{20} & w_{21} & w_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.23 & 1.87 \\ 0 & 0.10 & -3.23 \end{bmatrix}$$

$R^2=0.64$, RMS 为 8.28, 置信度水平 $\alpha=0.05$



地表形变速率场二阶傅里叶变换趋势面拟合结果

4.5 北部沉降区发展过程



扩展方向：

(1) 第一阶段 (2003~2007)

主要沿西北—东南方向延伸

(2) 第二阶段 (2008~2010)

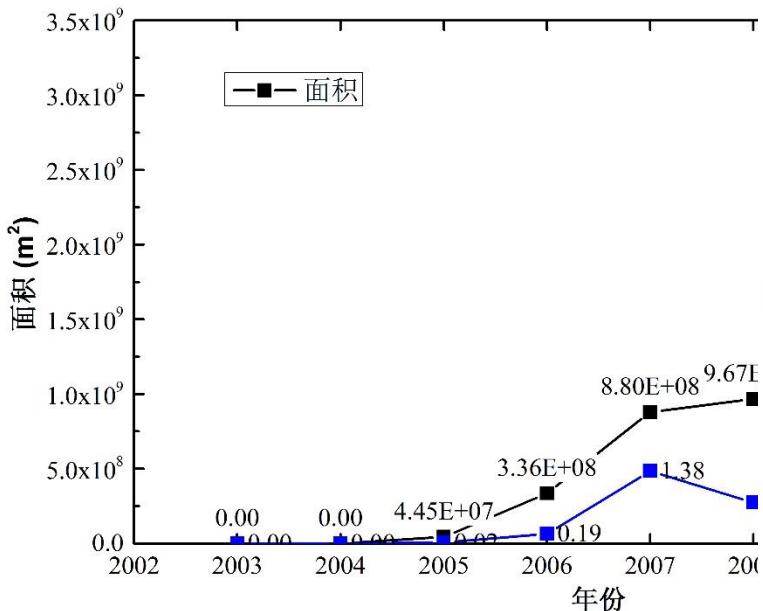
沿东、西两侧扩展

扩展范围：

2005~2008年为第一个扩展期

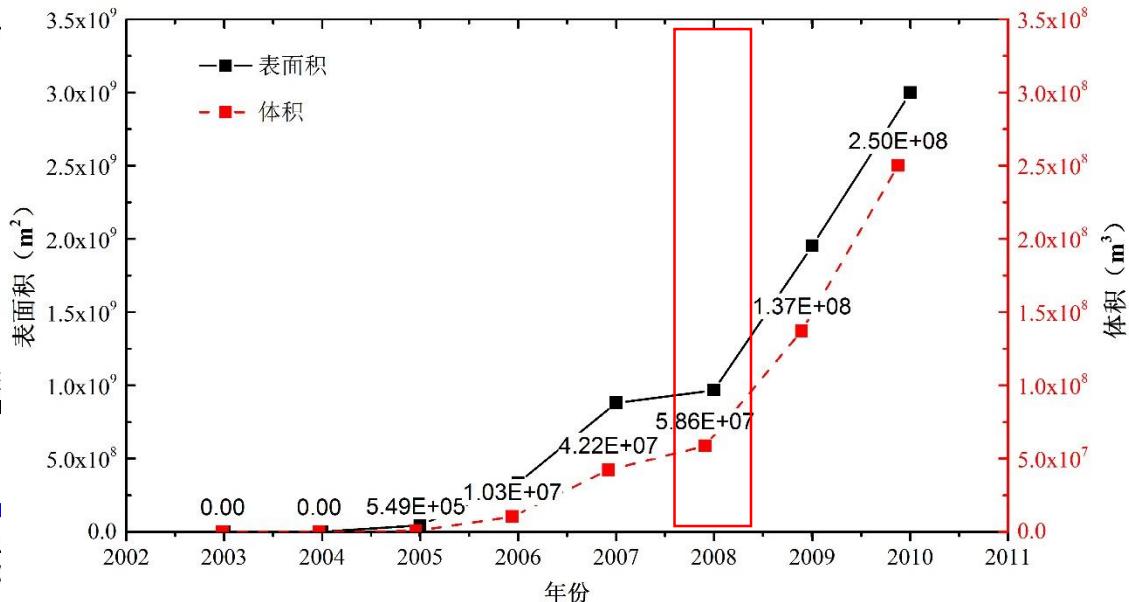
2008~2010年为第二个扩展期

地面沉降发展的量化分析



2003~2010年北部沉降区地表

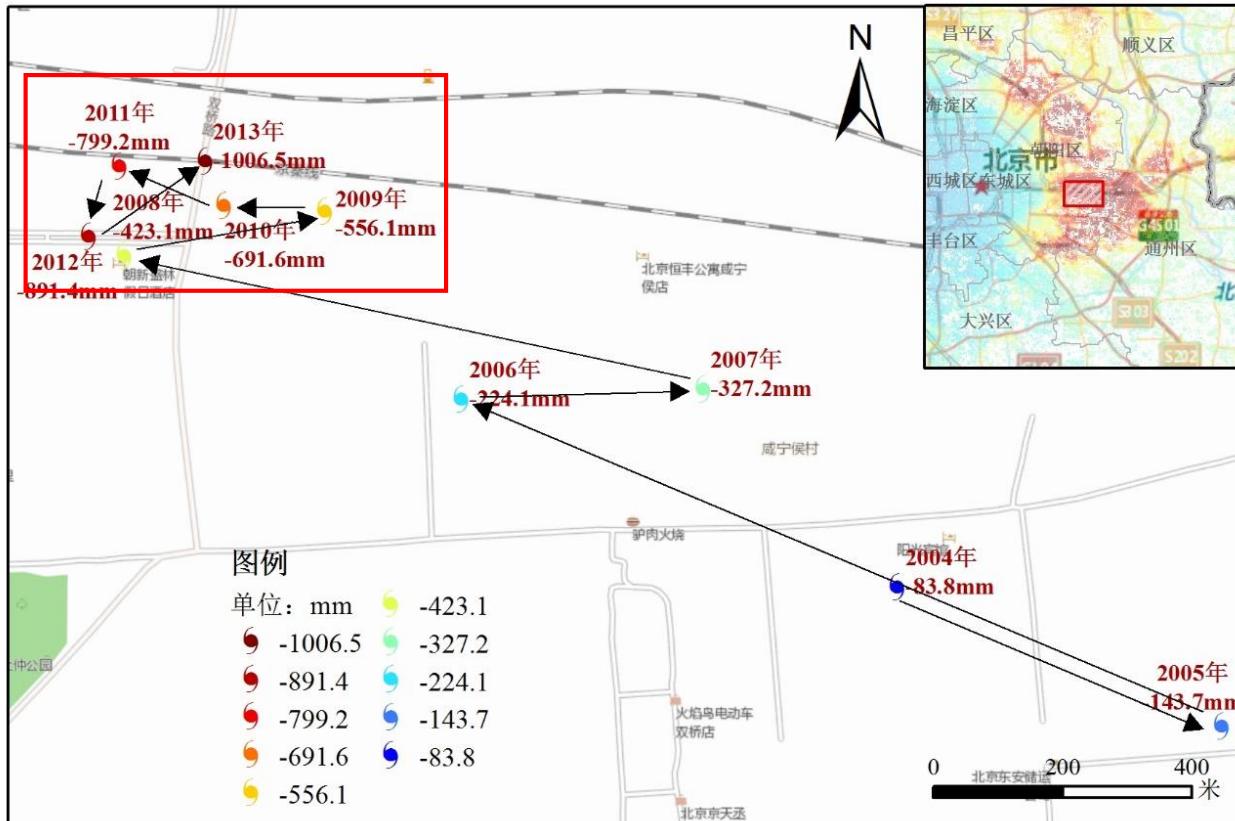
地面累计沉降量超过100 m，由2005年的 44.50 km^2 大幅增加到 2997.45 km^2 ，短短的5年时间里扩大了67倍。



2003~2010年沉降场曲面表面积及体积变化

沉降场外表面积的增长趋势与沉降场体积变化趋势基本一致，均在2007~2008年期间出现明显转折点，2008年后二者增长速度均急剧增加，约为2005~2008年增速的5倍。

地面沉降中心移动规律

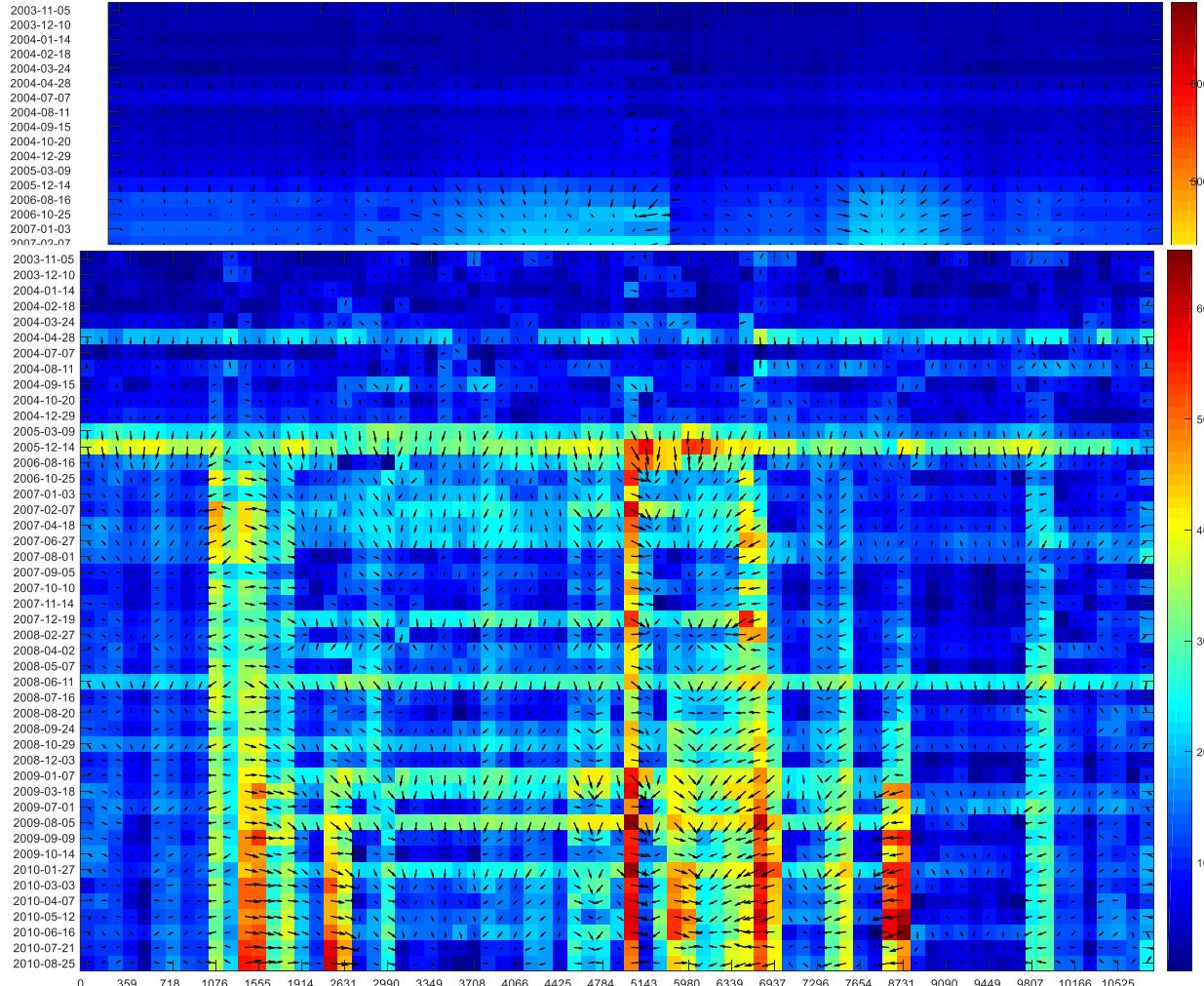


2004~2013年北京平原区地面沉降漏斗中心水平移动轨迹

- 北部沉降区漏斗中心位于咸宁侯—双桥沉降区
- 总体沿东南—西北方向移动, 最大位移量约1930 m
- 2008年以后, 沉降中心基本稳定在京秦线铁路双桥站以东约500 m、地铁八通线双桥站以南约1300 m地区
- 沉降漏斗中心聚集区紧靠京秦铁路, 可能对铁路的安全运行产生影响

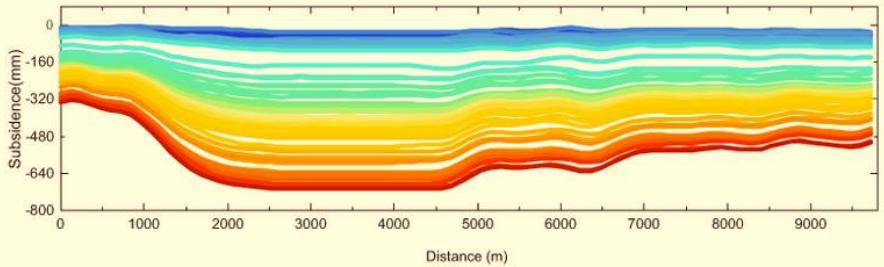


时序剖面梯度场分析

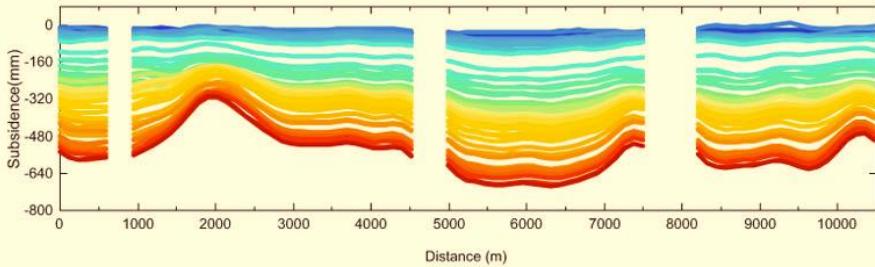


- “时间—距离” 标量场的梯度指向地面沉降中心所在的位置（**指示作用**）
 - 地面沉降在时间维表现一定的不均匀特征（**阶段性沉降**）
 - 沉降区内部地面沉降不均匀程度正在逐渐加剧（**发展趋势**）

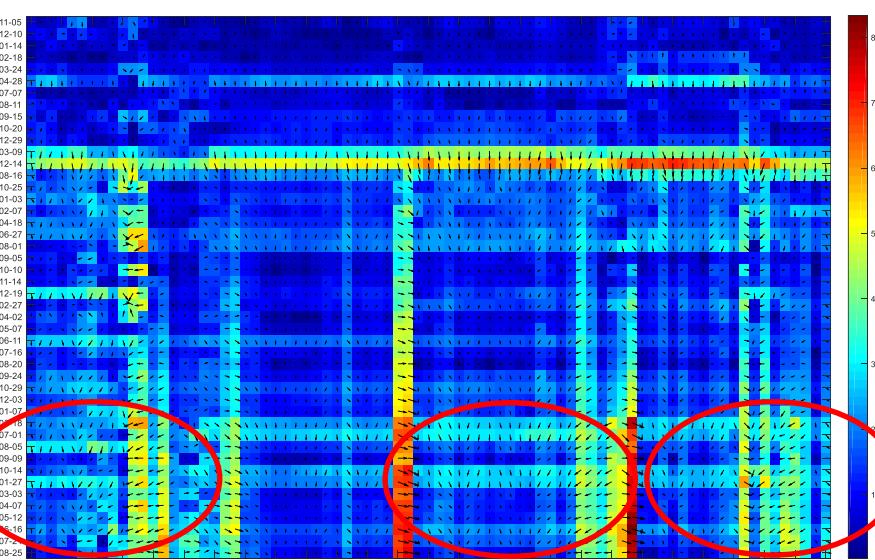
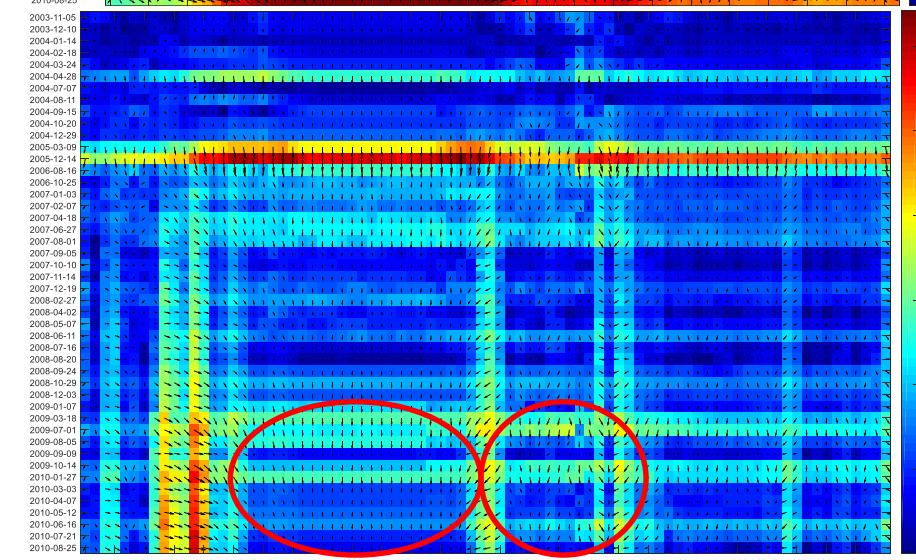
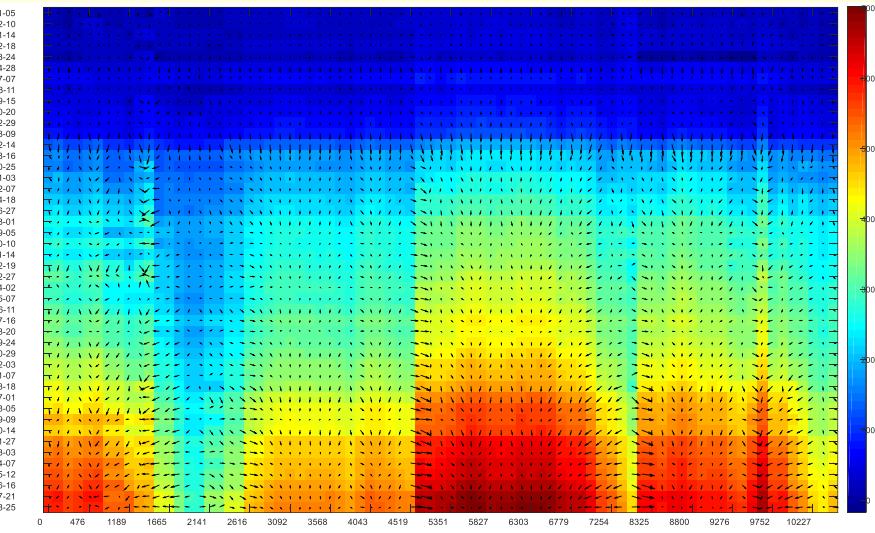
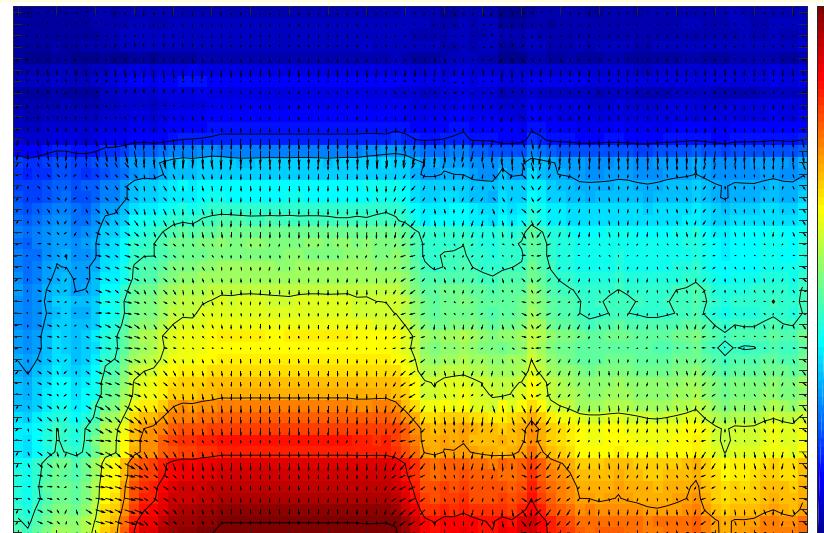
W-E



N-S



TZ-1



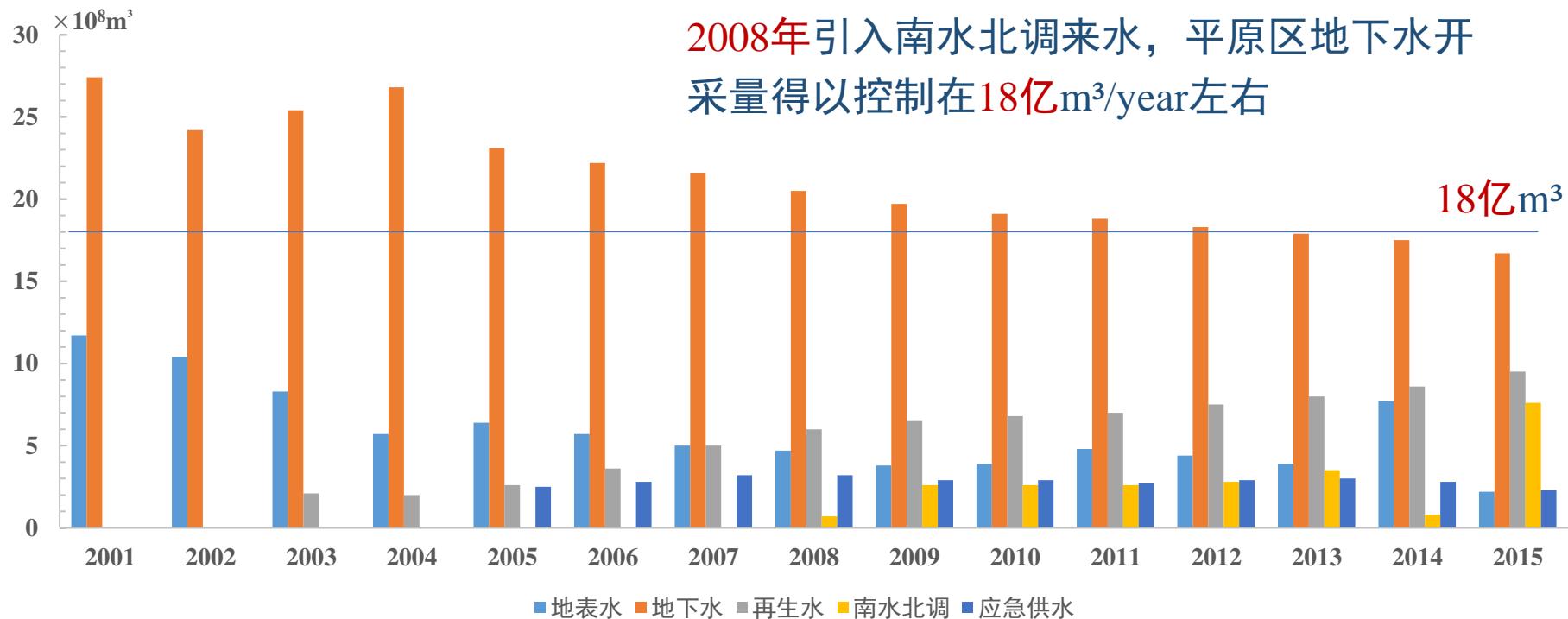


汇报提纲

- 一、背景介绍**
- 二、InSAR技术概述**
- 三、关键技术——MT-InSAR**
- 四、北京地面沉降演化特征**
- 五、地面沉降与地下水关联特征**
- 六、案例展示**

5.1 地下水流场演化过程

- 降水是北京水资源的主要来源，也是影响北京地下水位变化的主要因素之一
- 地下水开采量的变化是北京地下水排泄变化的最大影响因素



2001~2015年北京平原区降雨量与地下水分布概况

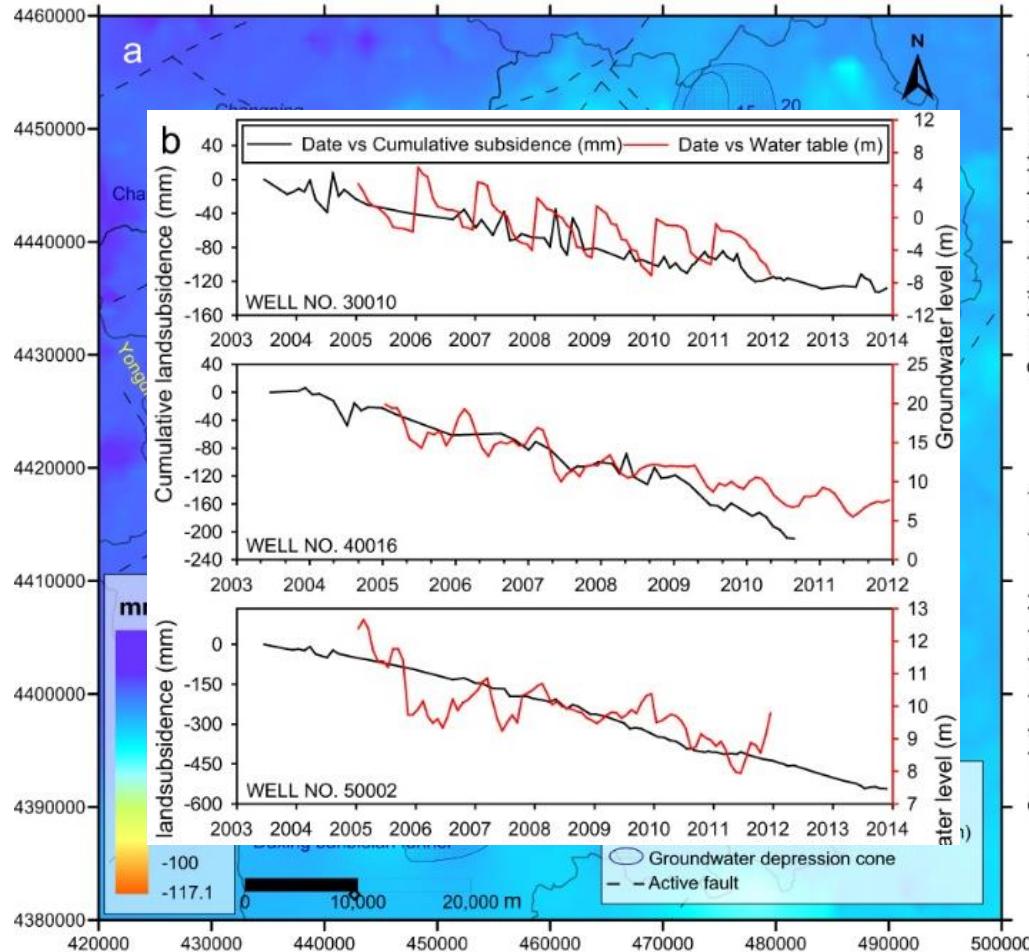
地下水水流场演化过程



北京平原地下水水流场演化 (1966-2010)

- 1966年：基本处于天然状态
- 1975年：朝阳区出现明显的降落漏斗
- 1985年：朝阳区地下水降落漏斗范围向东部扩张；顺义区北部出现新的降落漏斗
- 1996年：北京平原地下水位整体下降；在朝阳、通州、顺义三者交界处出现大型水位降落漏斗
- 2005年，水位降落漏斗范围进一步扩大；怀柔东南部新增一处小型降落漏斗
- 2010年，漏斗中心北移，北部各降落漏斗逐渐连成一片

5.2 沉降与地下水的时空关联特征

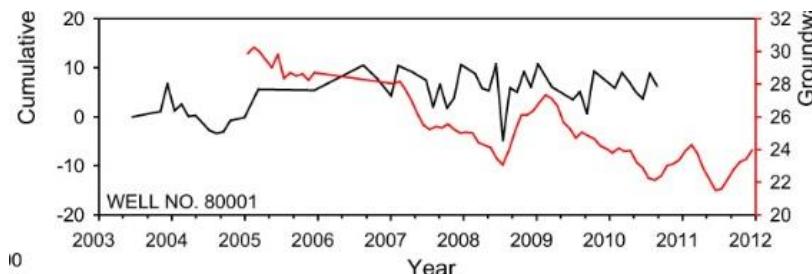


- 地面沉降年均速率与同时期地下水位等值线的**空间分布**具有很高的一致性，来广营、金盏、咸宁侯地区地下水漏斗中心与地面沉降中心**几乎完全重合**。
- 沉降区内部，地面沉降随着地下水位的下降逐渐增加，呈现相似的趋势。

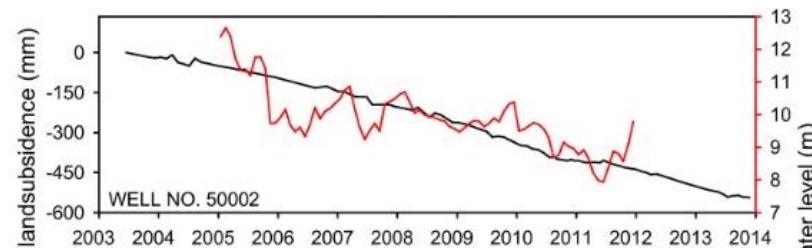
2003~2010年北部沉降区地下水降落漏斗与地面累计沉降量分布图

5.2 沉降与地下水的时空关联特征

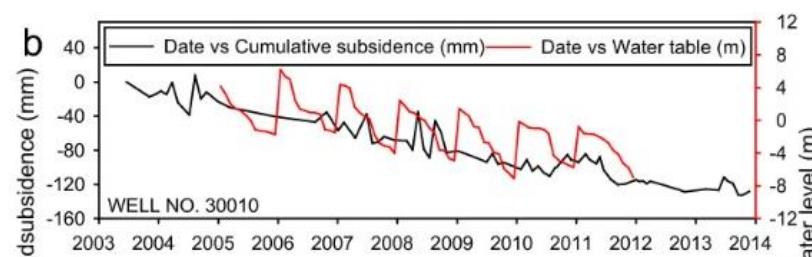
Marie and Manoochehr (2015) 指出, 由于可恢复性弹性形变和非弹性永久压实引起的地面沉降, 是地下水开采引起的多孔介质弹性响应的集中表现。



位于沉降区外：
地表随着地下水位的变化而作出弹性形变响应



位于沉降中心附近：
地表随着地下水位的变化而作出非弹性形变响应

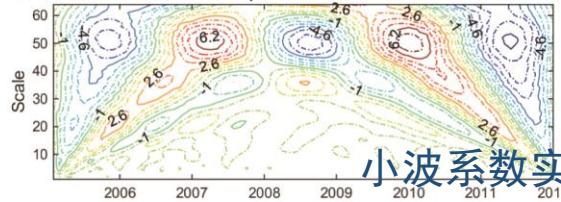


位于灌溉影响范围：
地表随着地下水位的周期性变化出现规律性波动

5.2 沉降与地下水的时空关联特征

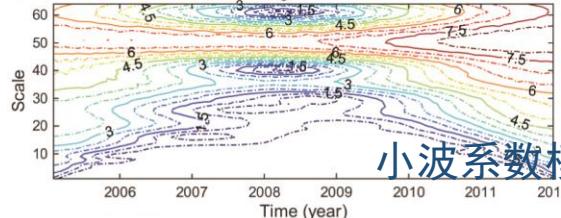
编号50002监测井位

a. The contour lines of the real part of CWT



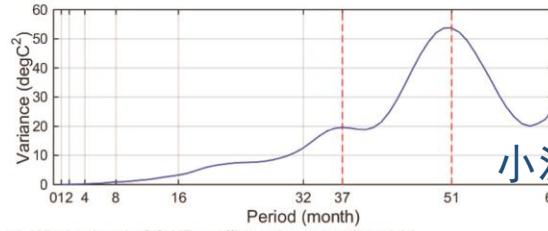
小波系数实部等值线图

b. The coefficient modulus of the signal in different scale



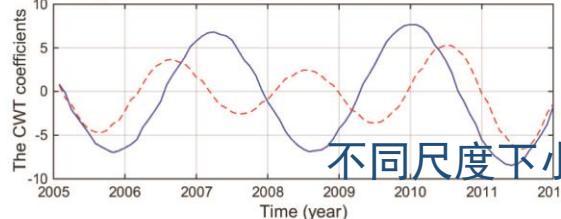
小波系数模方等值线图

c. Wavelet variance



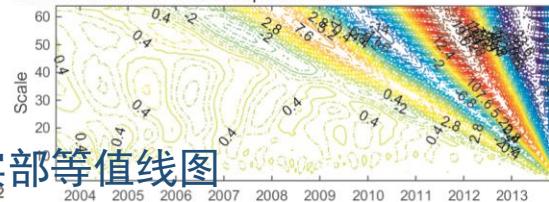
小波方差图

d. Whole signal of CWT coefficient in scale 37 and 51

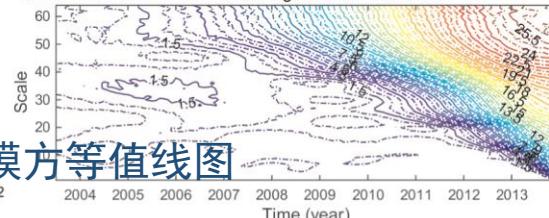


不同尺度下小波系数过程线

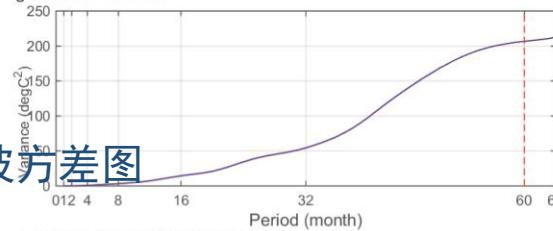
e. The contour lines of the real part of CWT



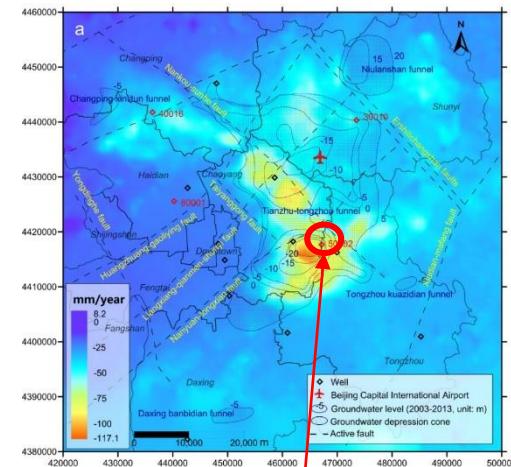
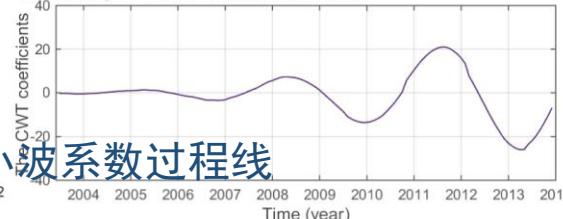
f. The coefficient modulus of the signal in different scale



g. Wavelet variance



h. Whole signal of CWT coefficient in scale 60



a~d为编号50002监测井位时间序列的小波变换结果。

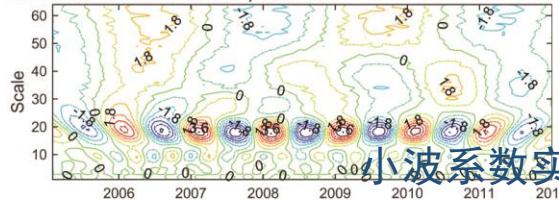
e~h为同一位置地面沉降时间序列的小波变换结果

地下水位变化和地面沉降时间序列连续复小波变换结果

5.2 沉降与地下水的时空关联特征

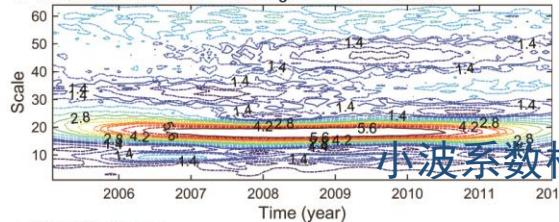
编号30010监测井位

a. The contour lines of the real part of CWT



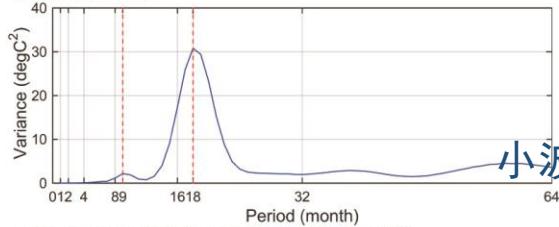
小波系数实部等值线图

b. The coefficient modulus of the signal in different scale



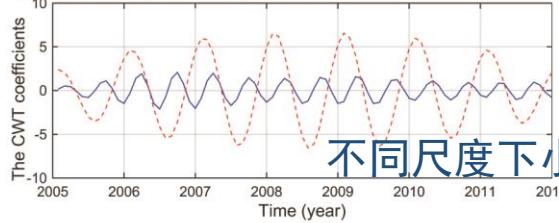
小波系数模方等值线图

c. Wavelet variance



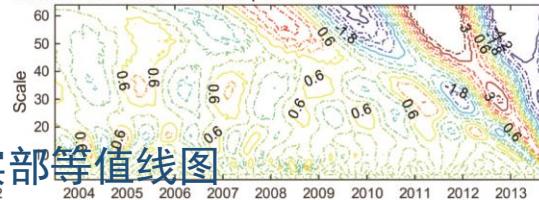
小波方差图

d. Whole signal of CWT coefficient in scale 9 and 18

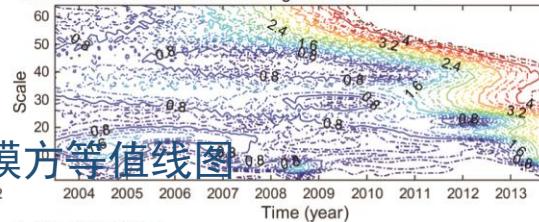


不同尺度下小波系数过程线

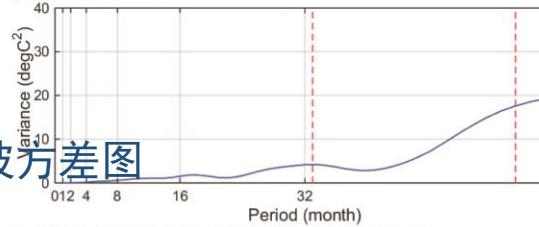
e. The contour lines of the real part of CWT



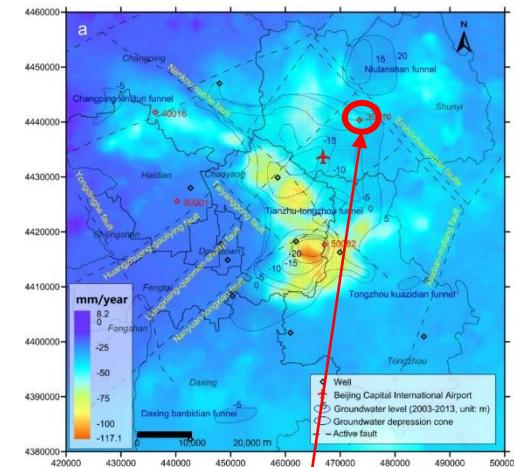
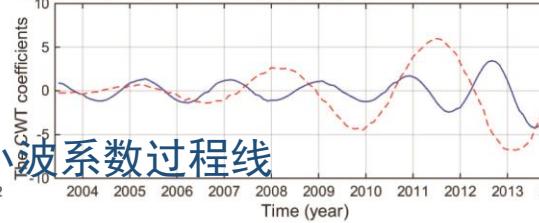
f. The coefficient modulus of the signal in different scale



g. Wavelet variance



h. Whole signal of CWT coefficient in scale 33 and 59

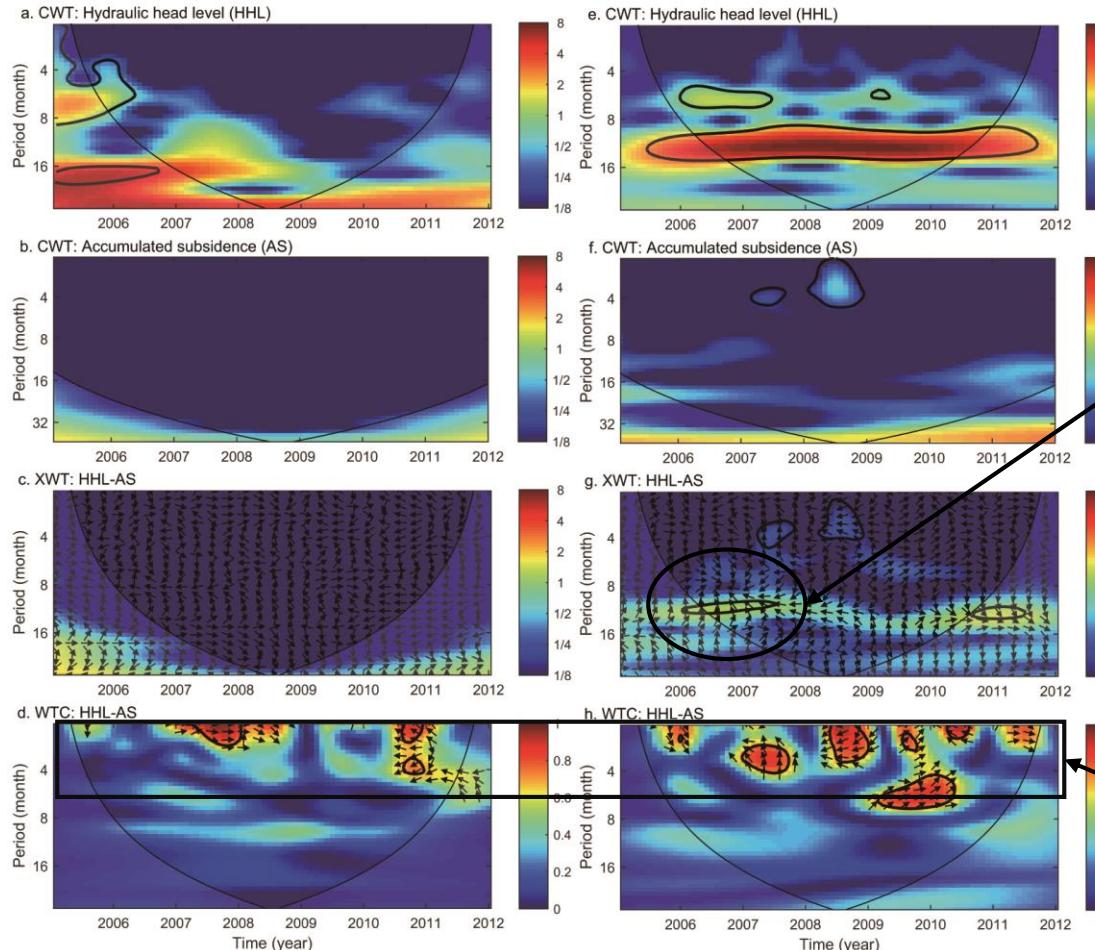


a~d为编号30010监测井位时间序列的小波变换结果。

e~h为同一位置地面沉降时间序列的小波变换结果

地下水位变化和地面沉降时间序列连续复小波变换结果

5.3 沉降对地下水动态的响应



共振周期10~13月

影响时域范围：2006年3月
~2007年6月

相位角为 $118.6^\circ \pm 3.9^\circ$

表明该时段内地面沉降量时序变化滞后地下水位变化 $1/3$ 个周期，约为3.3~4.3个月

共振周期集中在高频部分

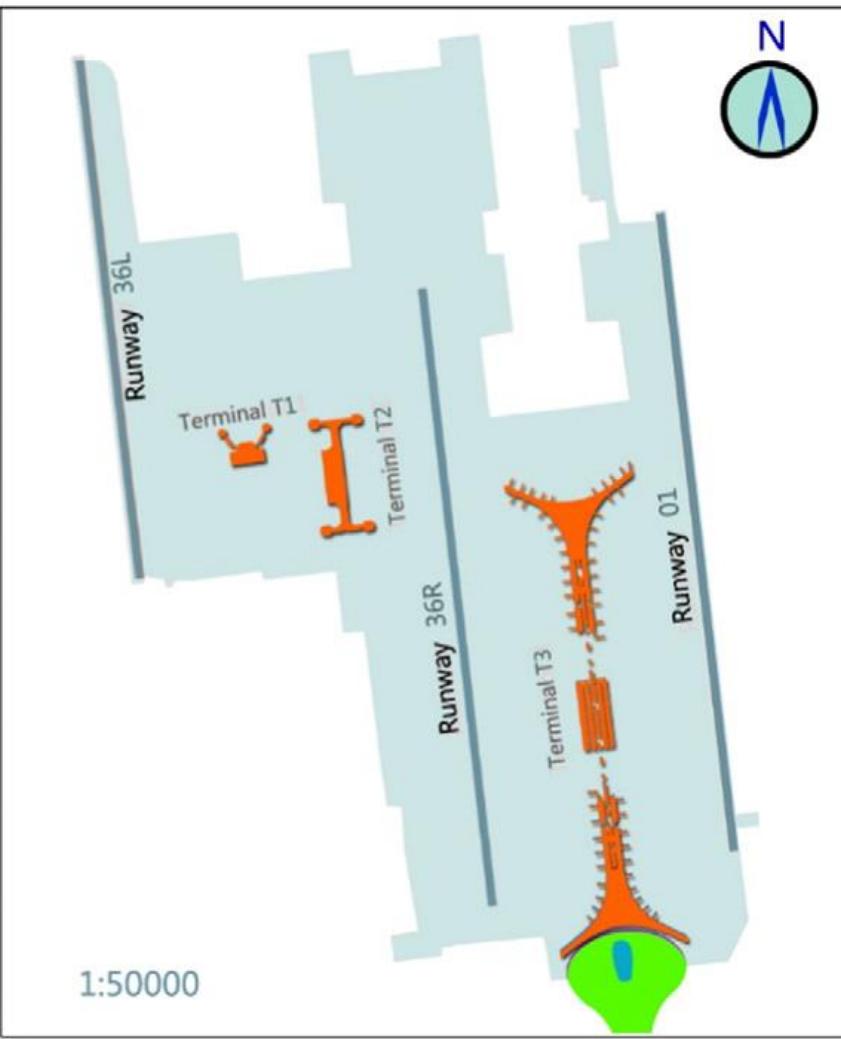
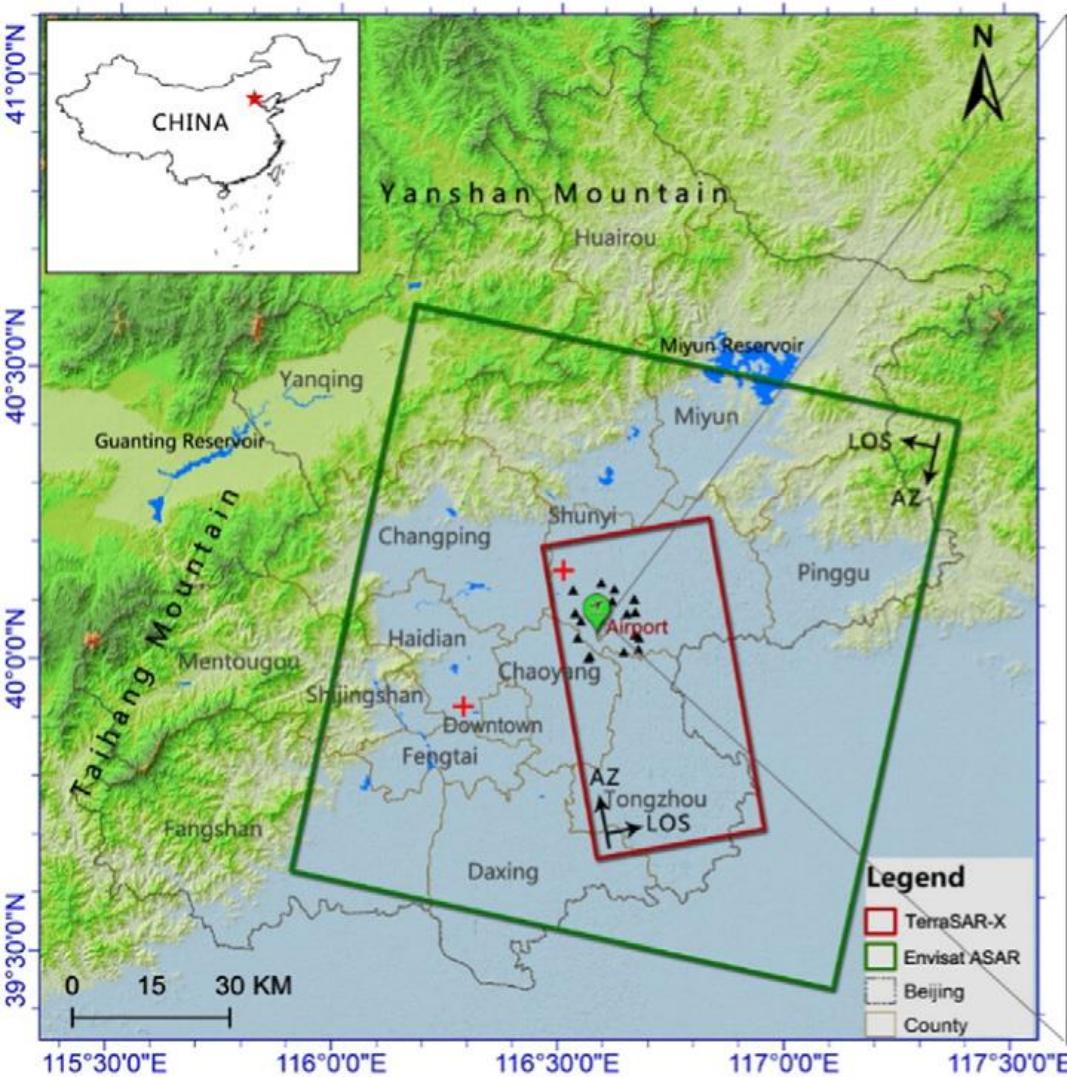
编号50002和编号30010监测井位小波分析结果

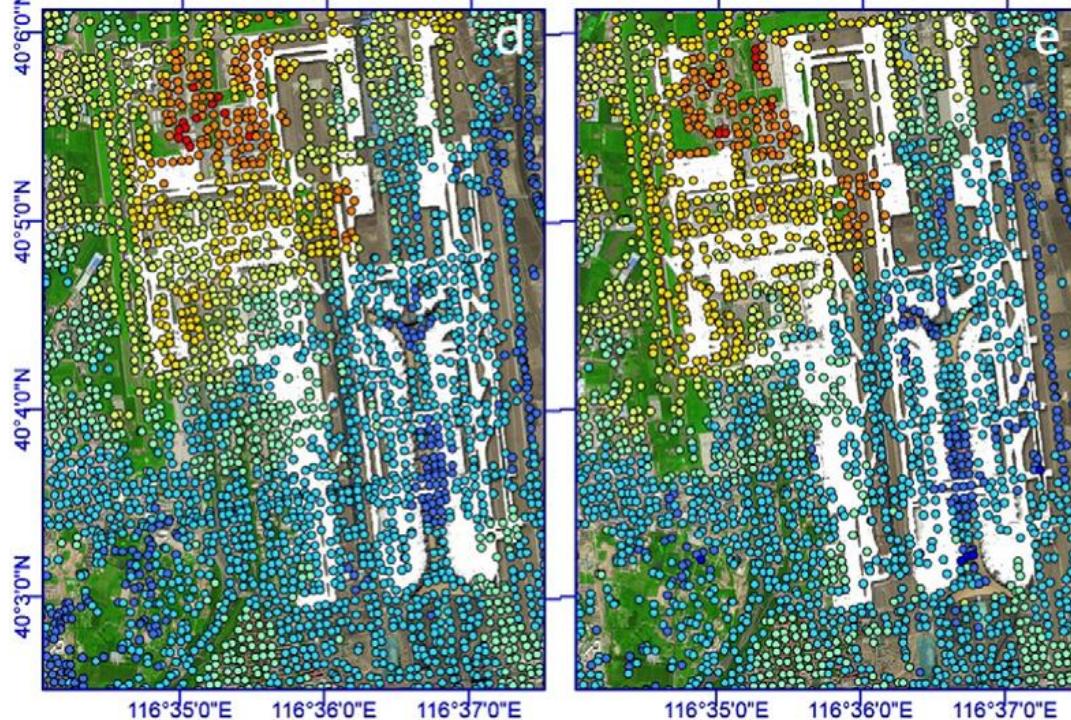
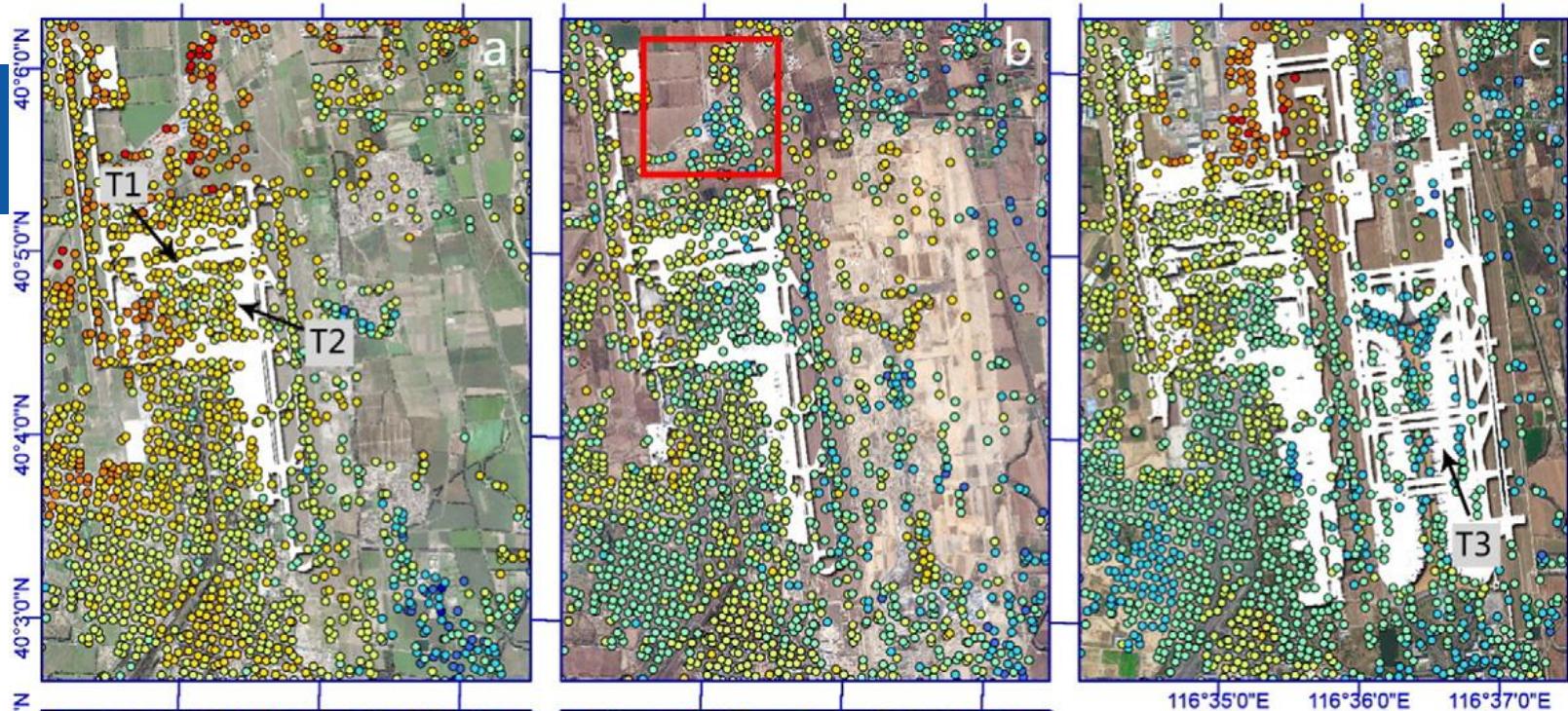


汇报提纲

- 一、背景介绍**
- 二、InSAR技术概述**
- 三、关键技术——MT-InSAR**
- 四、北京地面沉降演化特征**
- 五、地面沉降与地下水关联特征**
- 六、案例展示**

北京首都国际机场





Deformation Velocity

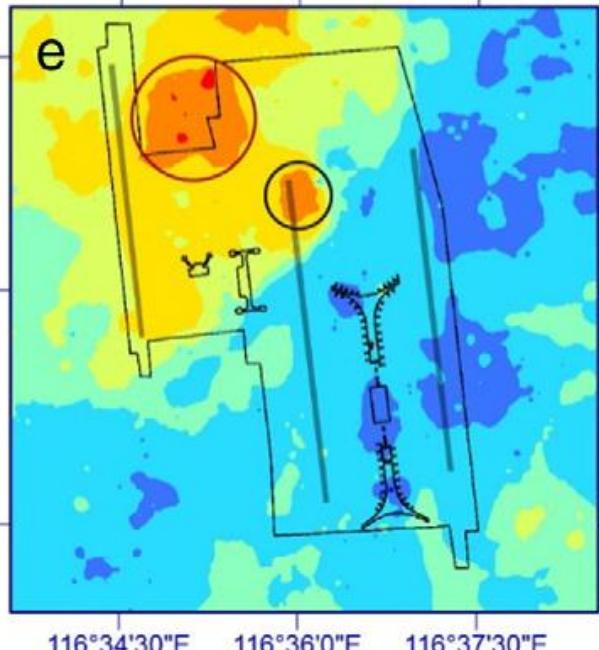
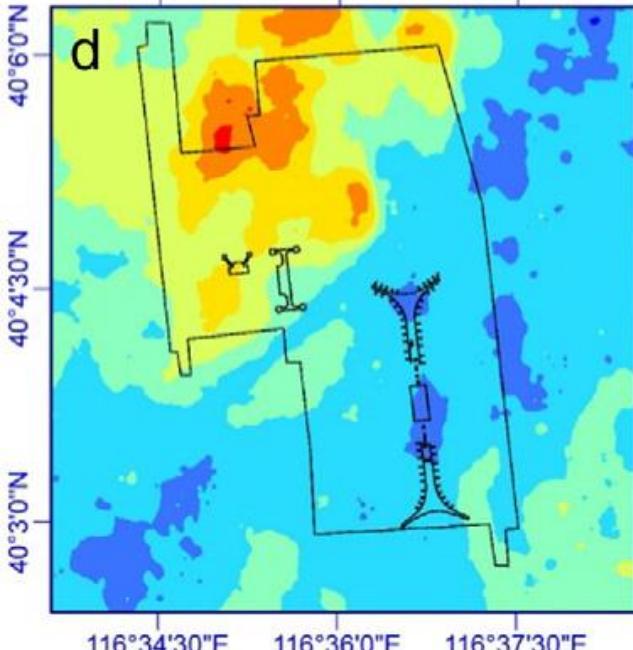
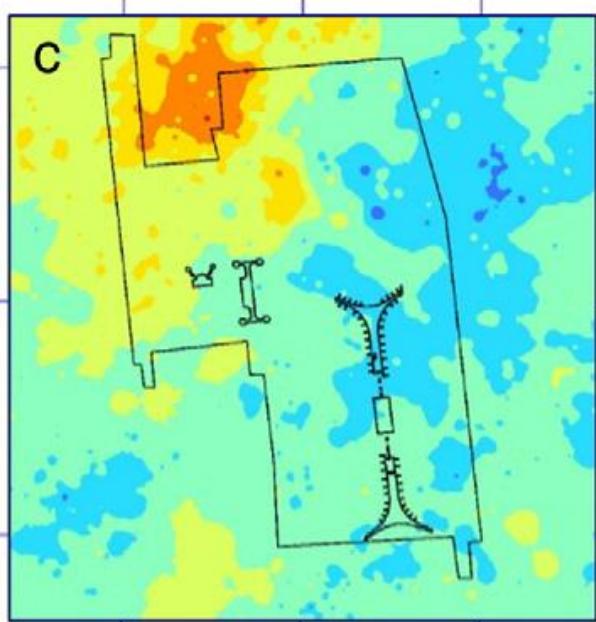
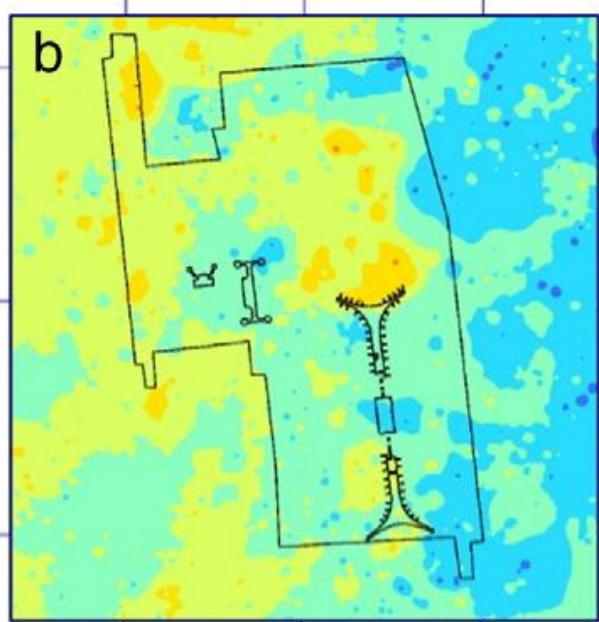
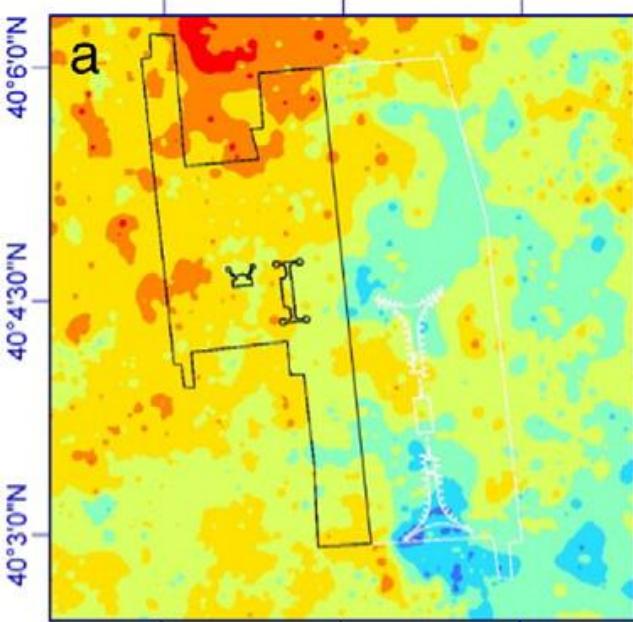
(mm/year)

- < -60.0
- -60.0 -- -50.0
- -50.0 -- -40.0
- -40.0 -- -30.0
- -30.0 -- -20.0
- -20.0 -- -10.0
- -10.0 -- 0
- 0 -- 10.0



2003.6-2013.12

0 1 2 km



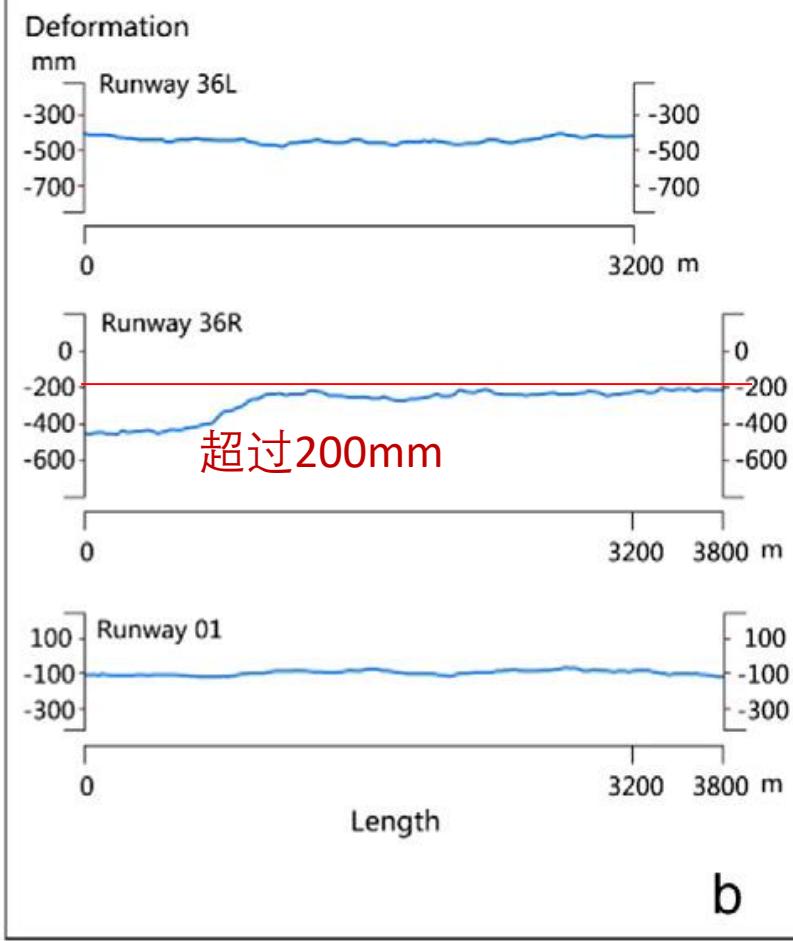
2003.6-2013.12

Deformation velocity
(mm/year)

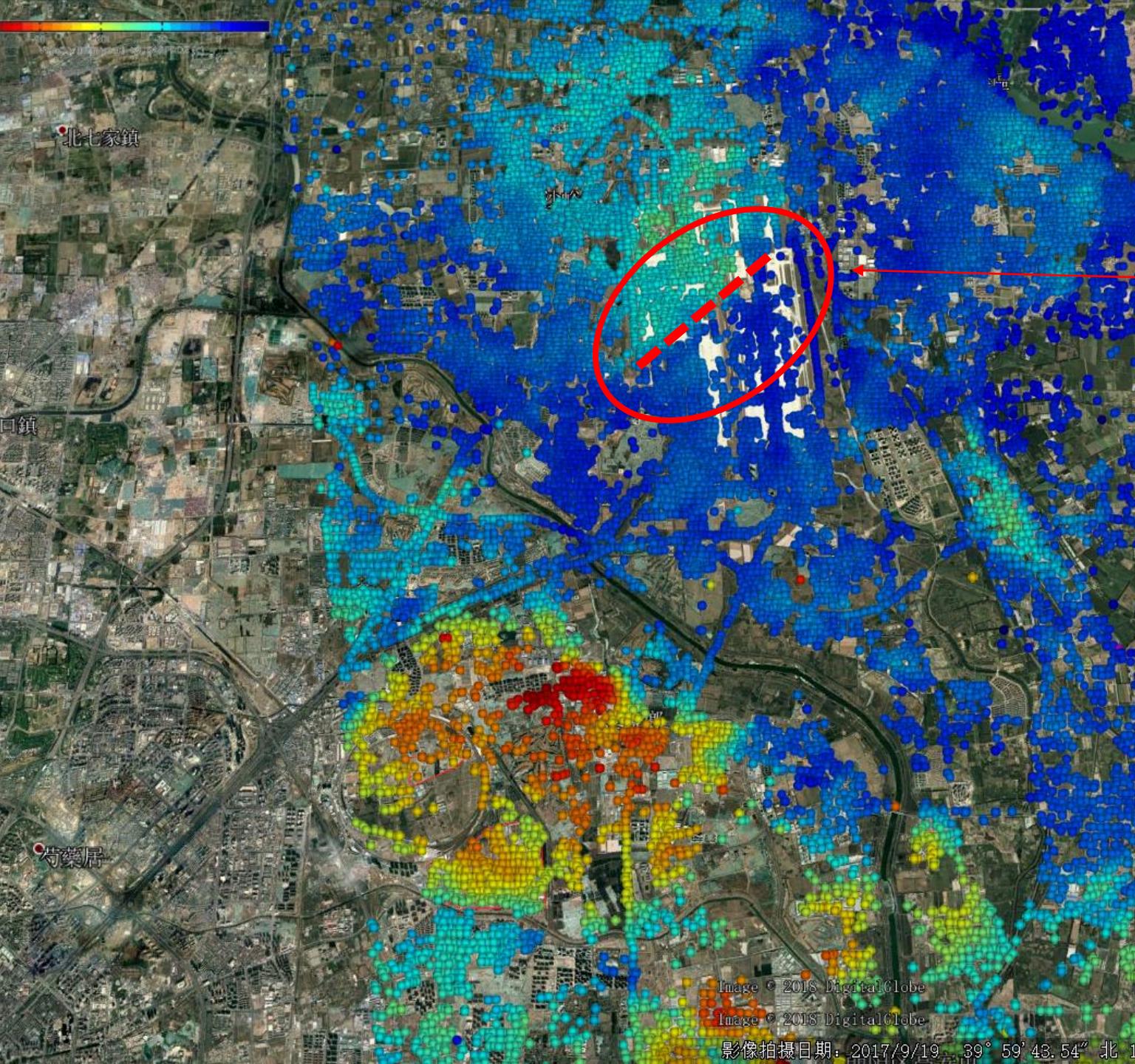
< -60.0
-60.0 - -50.0
-50.0 - -40.0
-40.0 - -30.0
-30.0 - -20.0
-20.0 - -10.0
-10.0 - 0
0 - 10.0

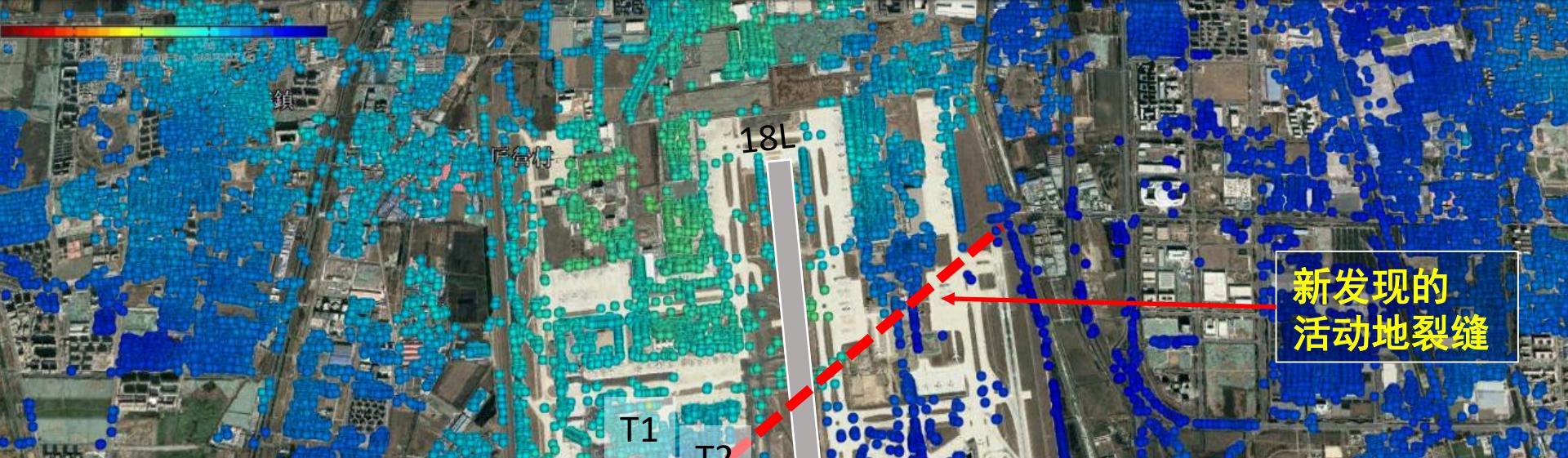


0 1 2 km



Gao M, Gong H, Chen B, et al. InSAR time-series investigation of long-term ground displacement at Beijing Capital International Airport, China[J]. Tectonophysics, 2016, 691:271-281.





新发现的
活动地裂缝

首都机场中跑道大修公告

2017-03-17

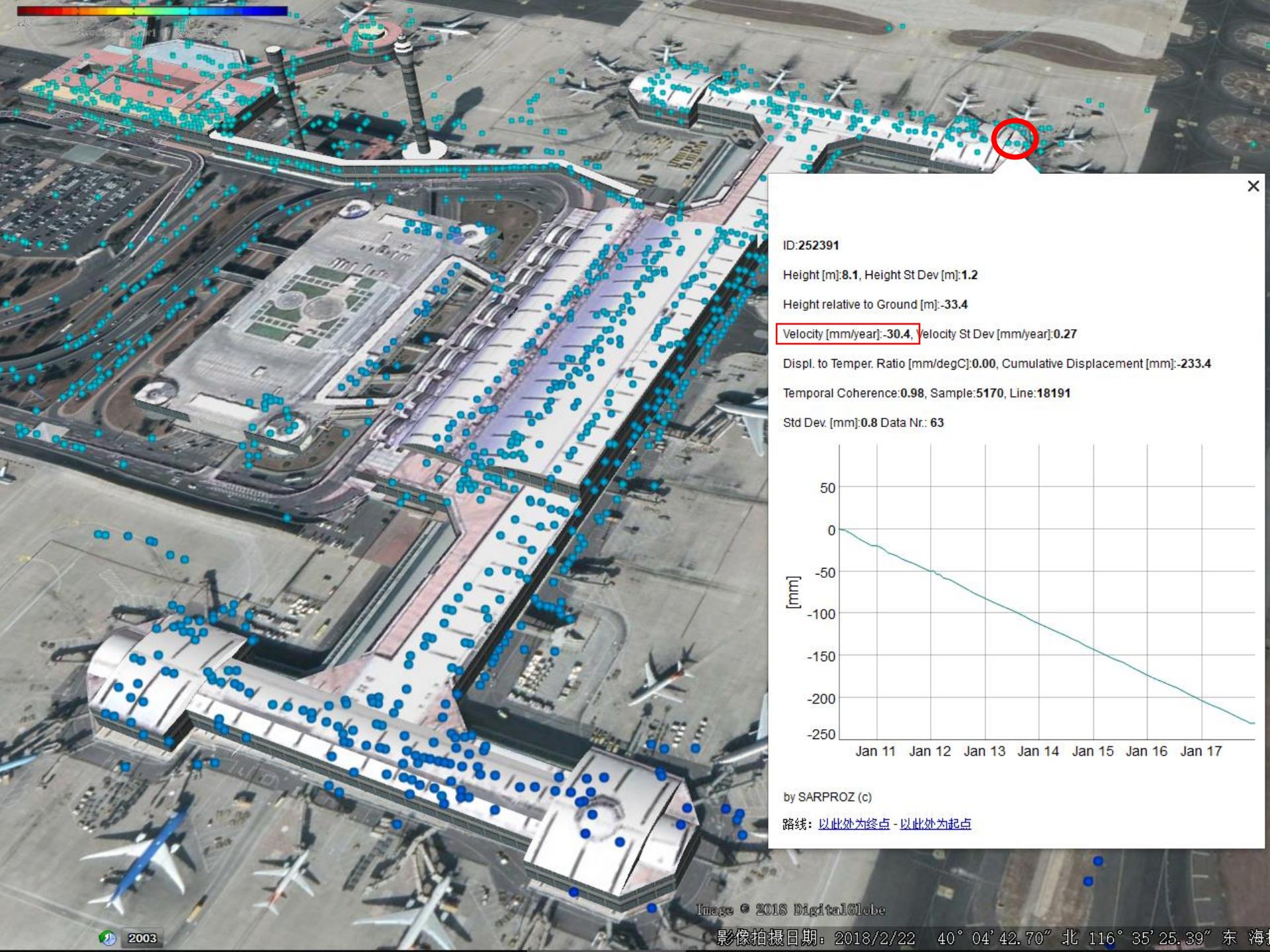
为给广大旅客提供更加安全顺畅的出行体验，并确保首都机场持续安全运行，根据机场整体运行情况和跑道维修计划，首都机场定于2017年4月2日00:00至4月29日23:59关闭中跑道，实施道面大修工程。

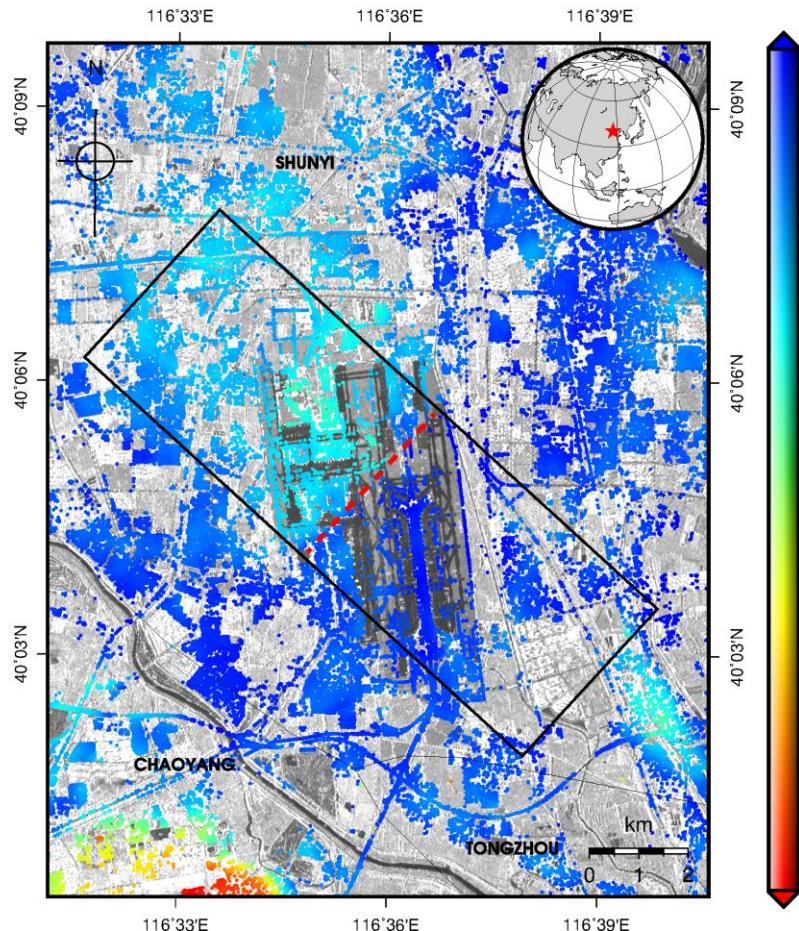
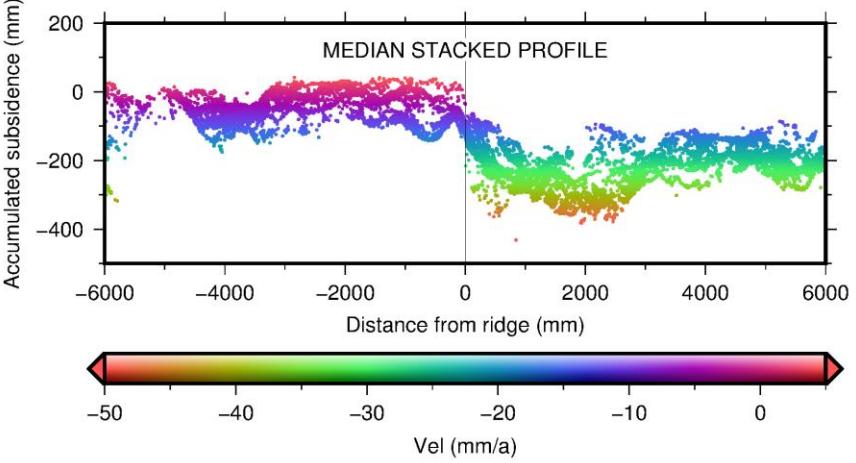
届时，首都机场将由三条跑道运行调整为两条跑道运行。为此，首都机场已会同空管部门、航空公司等驻场单位对该时间段在首都机场运行的部分航班计划进行了调减，同时制定了周密的运行保障方案，全力降低中跑道大修工程对航班运行的影响。请广大旅客提前关注航班动态，及时与航空公司联系咨询，妥善安排出行计划。

对您的理解和支持，我们深表感谢！

北京首都国际机场股份有限公司

二〇一七年三月十七日







感谢聆听！

E-mail: b312@cnu.edu.cn

Tel.: 15652371394



龙计划四期·2019-6

