

天琴二号重力卫星计划

罗志才

华中科技大学，引力中心 / 地球物理研究所

中国科学院上海天文台“天地时空论坛” · 2022/10/28

1 研究背景

2 重力卫星数据处理进展

2.1 L0数据处理技术

2.2 L1a数据精细处理

2.3 基于L1b数据的精细建模

3 TQ-2反演地球重力场

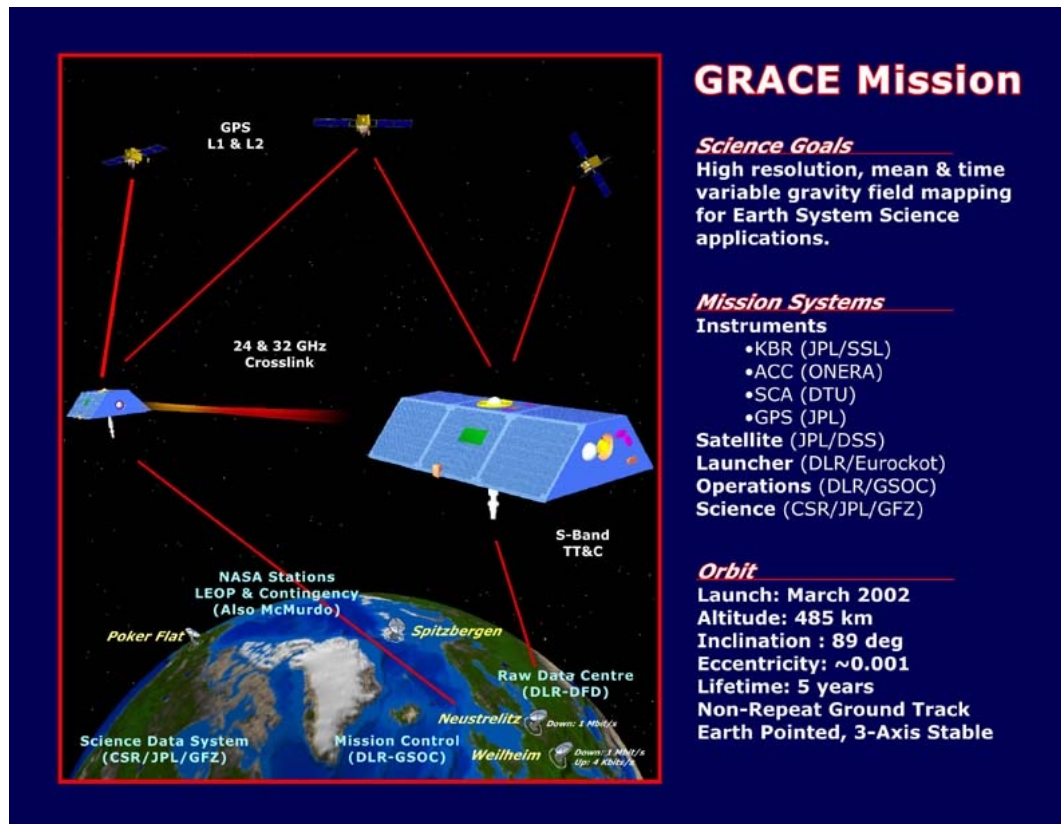
3.1 一组极轨模式

3.2 一组倾轨模式

3.3 极轨+倾轨的组合模式

4 结论与展望

1 研究背景



2002年3月17日



Mission Elapsed Time

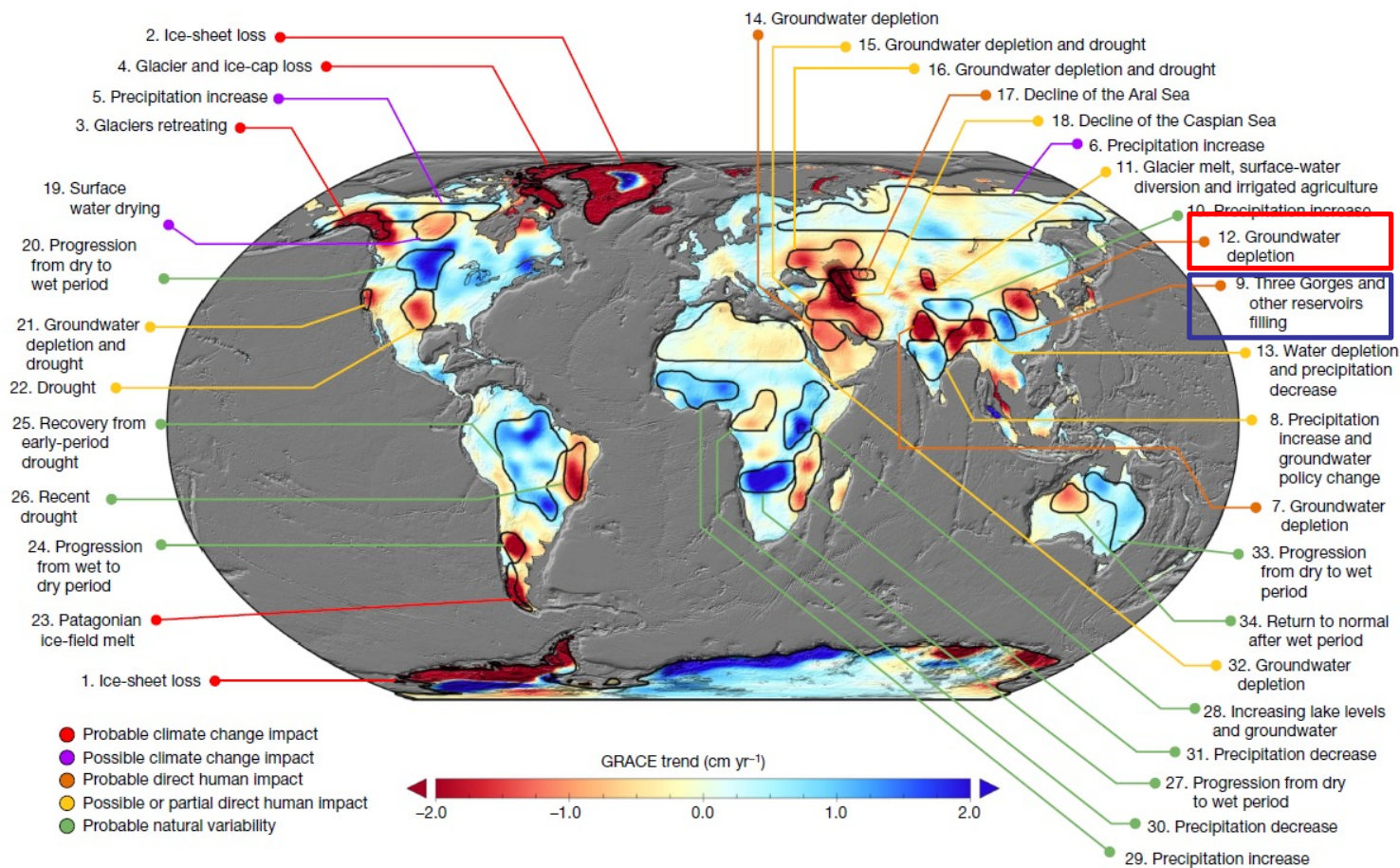
Days	Hours
6136	02



2017年10月27日

GRACE卫星为人类研究陆地水文气候变化、冰川消融与海平面变化、地震及人类活动引起的大中尺度地表质量变化提供重要的数据积累。

1 研究背景

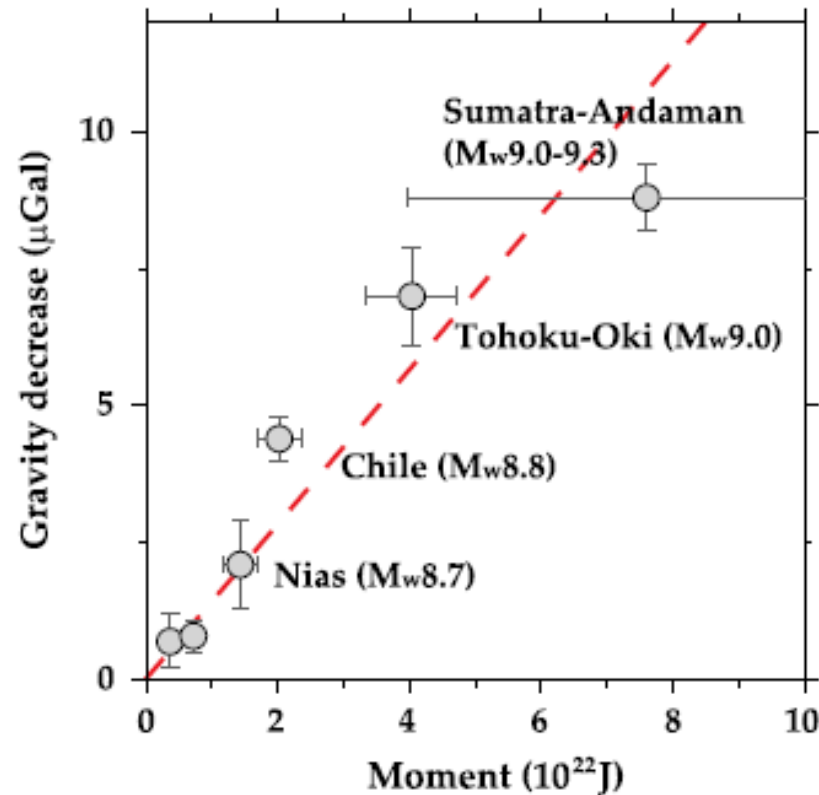


华北地下水超采

三峡水库对长江流域水储量的影响

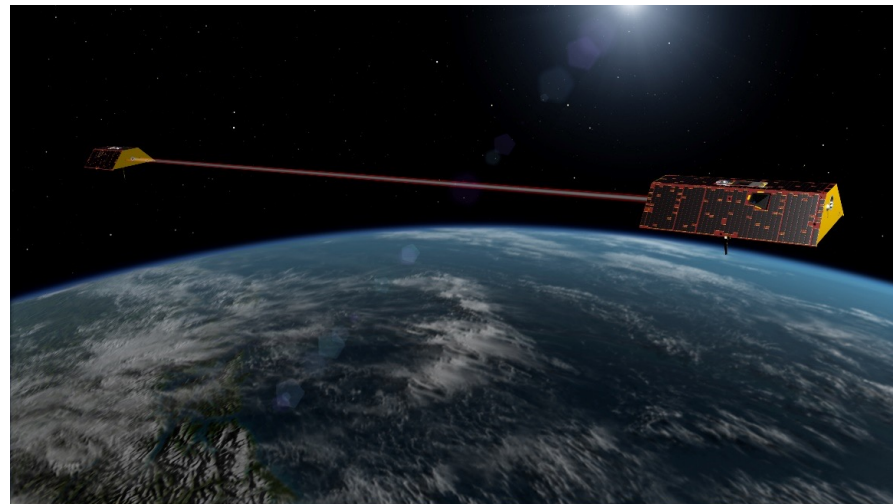
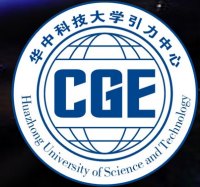
引自Rodell et al., 2018, *Nature*

1 研究背景



Coseismic gravity decreases observed by GRACE for recent earthquakes larger than M_w 8 as a function of seismic moment. (Matsuo, K., and K. Heki (2011), GRL, 38, L00G12, doi:10.1029/2011GL049018.)

1 研究背景



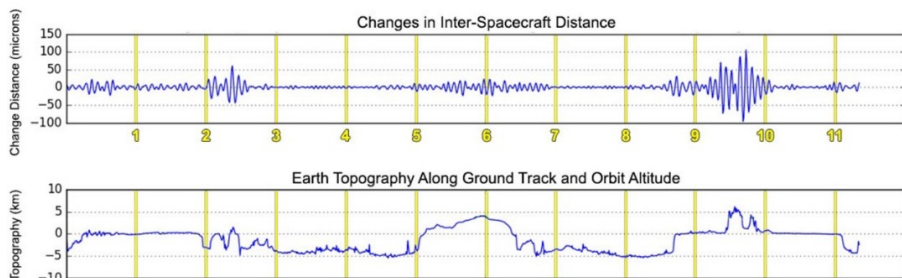
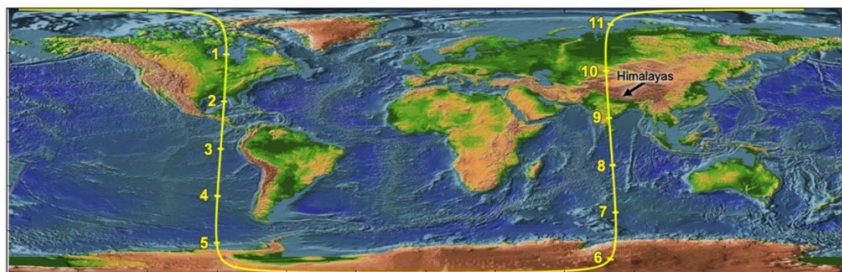
GRACE Follow-On

发射时间: **2018.05.22**

倾角: 极轨, 89度 高度: 500 km 星间距离: 220 km 每天轨道圈数: ~15

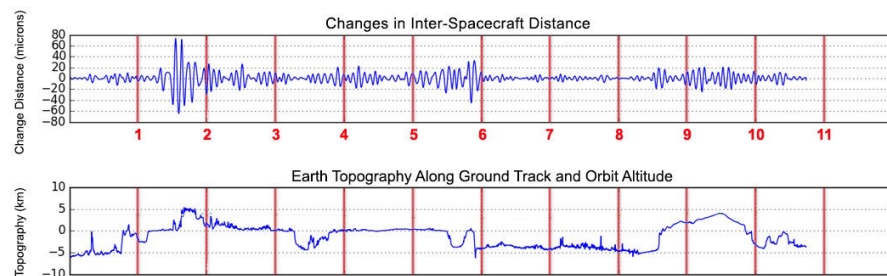
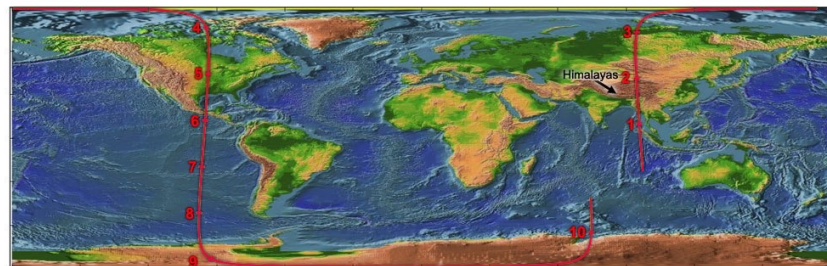
1 研究背景

GRACE-FO Single-Orbit Ground Track, May 30, 2018



微波测距系统测量的星间距离变化

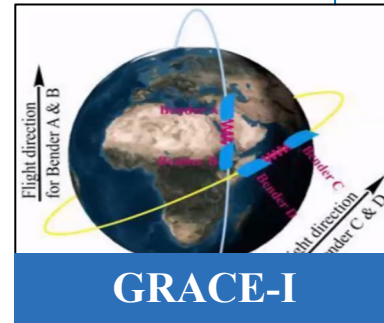
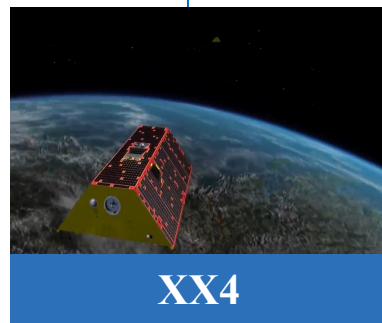
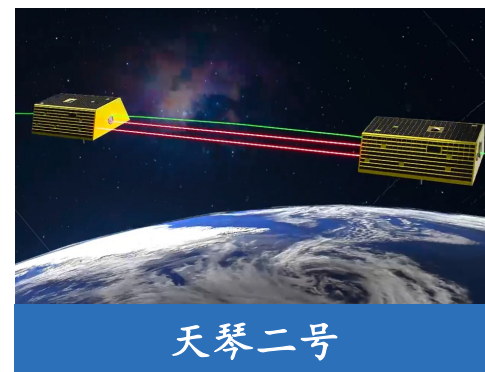
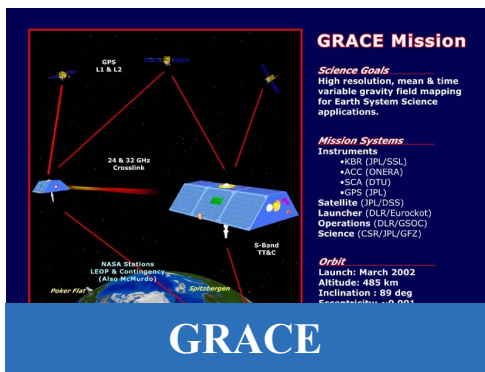
GRACE-FO Single-Orbit Ground Track, June 14, 2018



激光测距系统测量到的星间距离变化

- ◆ GRACE Follow-On卫星具备**延续**GRACE监测全球地表质量变化的能力
- ◆ 首次开展空间**激光测距**实验，为后续重力卫星计划提供技术支撑

1 研究背景



- ◆ 发展具有自主知识产权的重力卫星计划，提升重力场的精度和时空分辨率
- ◆ 开展空间激光测距实验，为我国下一代重力卫星和引力波探测提供技术支撑

1 研究背景

2 重力卫星数据处理进展

2.1 L0数据处理技术

2.2 L1a数据精细处理

2.3 基于L1b数据的精细建模

3 TQ-2反演地球重力场

3.1 一组极轨模式

3.2 一组倾轨模式

3.3 极轨+倾轨的组合模式

4 结论与展望

2 重力卫星数据处理进展

重力卫星数据分级策略： $L0 \rightarrow L1a \rightarrow L1b \rightarrow L2 \rightarrow L3$

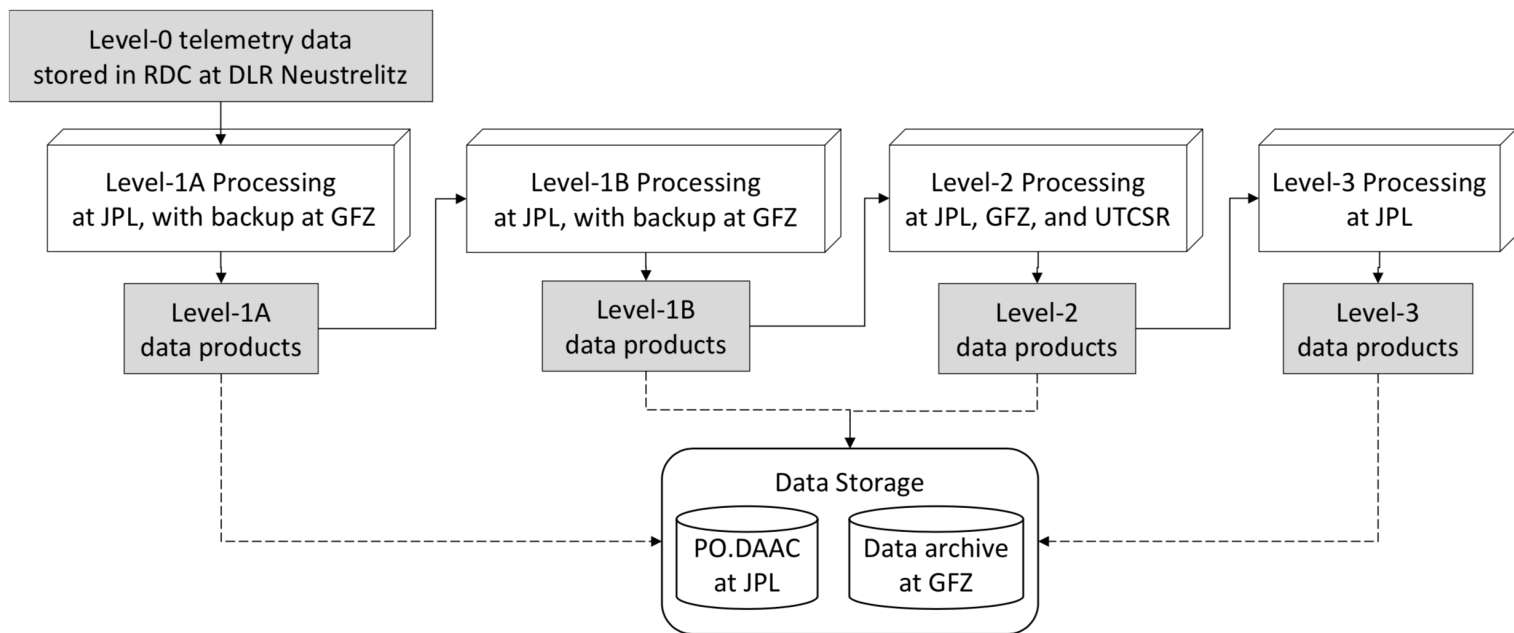


Figure 5: GRACE-FO SDS processing levels and flow.

- ◆ L0 数据：由卫星收集并传输到地面的原始观测数据
- ◆ L1a数据：对L0数据进行非破坏性处理的数据集
- ◆ L1b数据：对L1a数据进行时标校正、噪声抑制、滤波和重采样等处理
- ◆ L2 数据：基于L1b数据获得的重力场模型产品

2 重力卫星数据处理进展

◆ 重力卫星数据处理系统原型v1.0




华中科技大学
HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

引力中心
GRAVITY CENTER

[粗差探测](#)
[数据插值](#)
[时变改正](#)
[外部校准](#)
[有色噪声滤波](#)
[L1级数据处理](#)
[KBR程序](#)

重力梯度数据粗差探测程序

重力梯度数据粗差探测程序实现利用阈值法、Dixon检验和小波分析方法对重力梯度数据进行粗差探测。阈值法是通过利用样本数据的极差作为统计量利用阈值的统计检验方法。小波分析法将数据进行小波分解，对每层小波系数设定阈值，利用极差定位粗差。

[阈值法探测](#)
[Dixon法探测](#)
[小波分析法探测](#)

有色噪声滤波程序

实现了利用“MA+ARMA”级联滤波器处理重力梯度数据中的低频系统误差和有色噪声以

- 1.移动平均(MA)滤波器首先通过移动平均的方法获取时间序列中的低频部分，再将重力
- 2.自回归移动平均(ARMA)滤波器是基于ARMA模型构建的去相关滤波器，其模型阶数

[开始运算](#)
[查看结果](#)

KBR程序

当前版本: v1.0.1

[开始运算](#)
[下载结果文件](#)

功能描述

实现利用阈值法、Dixon检验和小波分析方法对重力梯度数据进行粗差探测。

- 1.阈值法是通过某一数据与平均值之差的绝对值是否在一定阈值内来判断粗差。
- 2.Dixon检验是利用样本数据的极差作为统计量利用阈值的统计检验方法。
- 3.小波分析法将数据进行小波分解，对每层小波系数设定阈值，保留信号系数，而将大部分噪声系数置为零，然后重构

说明：本模块可以选择上述3种粗差探测方法对输入的含粗差重力梯度时间序列文件data.txt进行处理，输出粗差探测标识并且统计粗差探测的命中率和失效率。

功能描述

输入数据:

- 1.重力梯度有色噪声时间序列文件dgg11GRF1s-1.txt

输出数据:

- 1.滤波前后的时间序列图(时间序列.jpg)
- 2.滤波前后的时间序列图(时间序列.jpg)

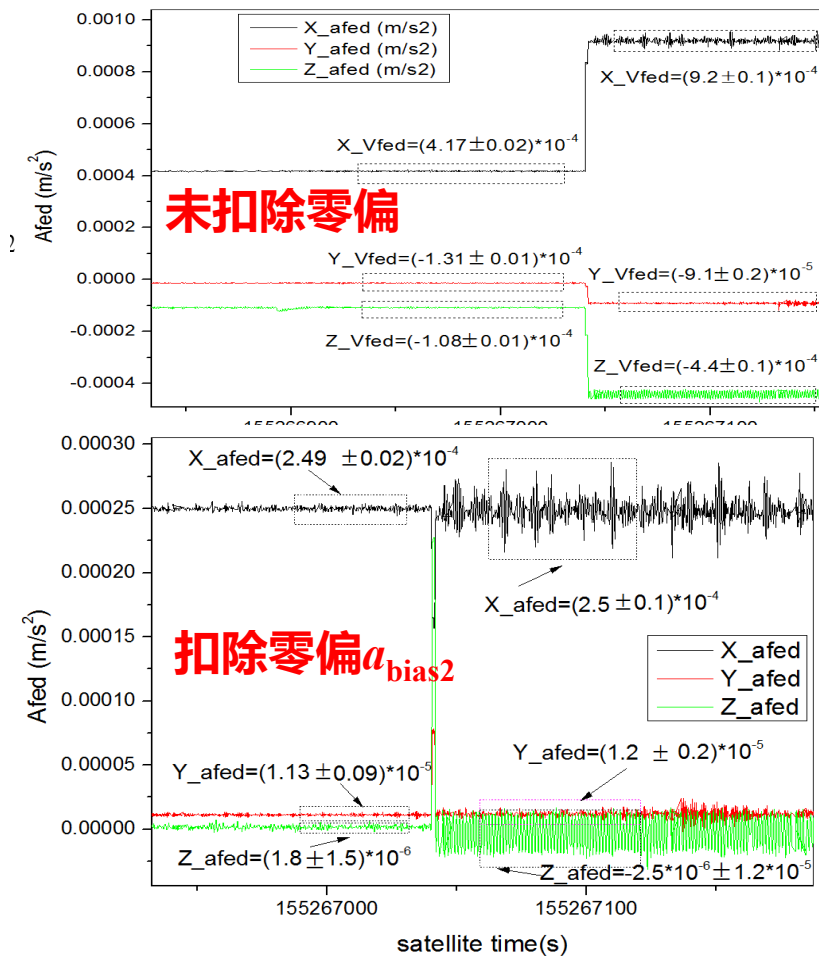
功能描述

将计算的数据放到InputData的文件下。

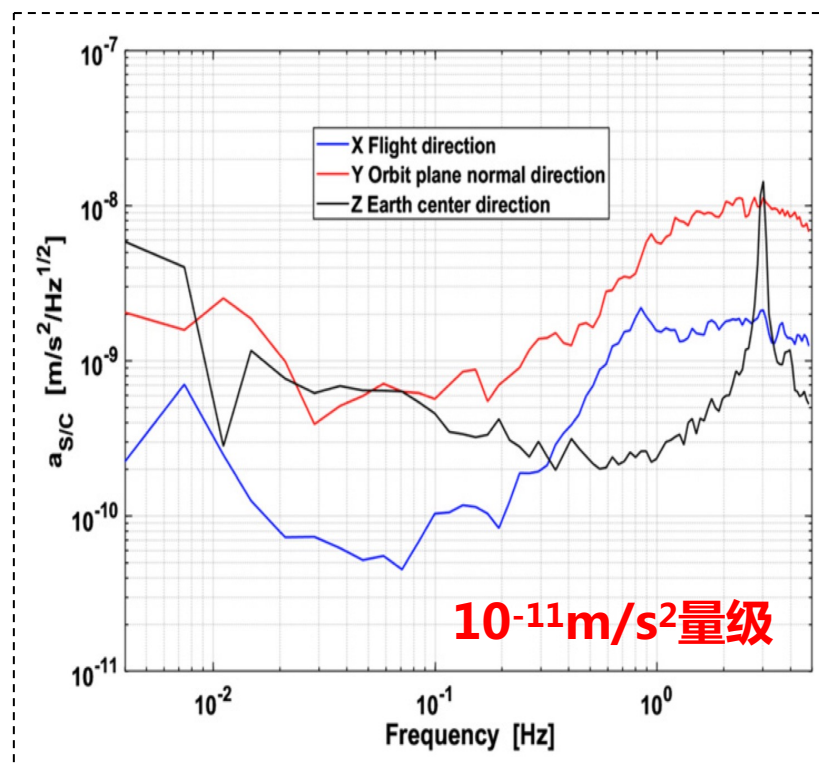
- 1.该软件的功能为计算GRACE-FO中KBR1A到KBR1B。
- 2.只适用于GRACE-FO数据。
- 3.该软件需要的平台为Windows系统以及Inter-FORTRAN。

2 重力卫星数据处理进展

◆ L0数据处理



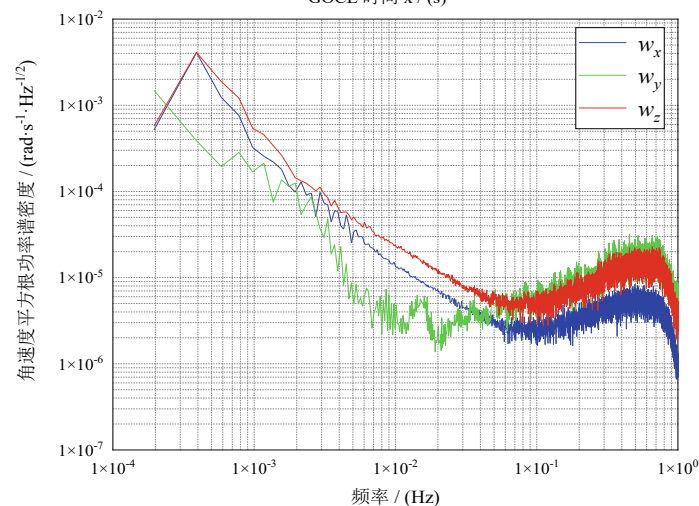
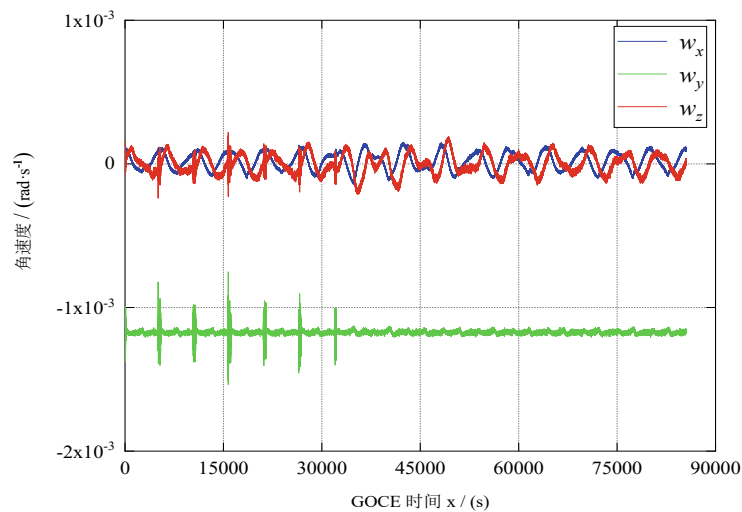
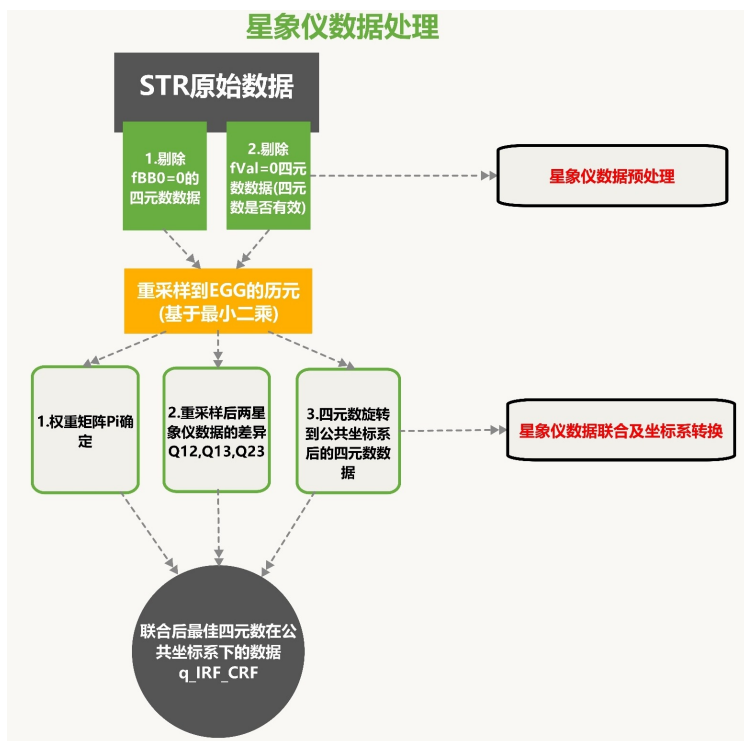
TZ-1加速度计数据的在轨标定



TQ-1加速度计数据的在轨标定

2 重力卫星数据处理进展

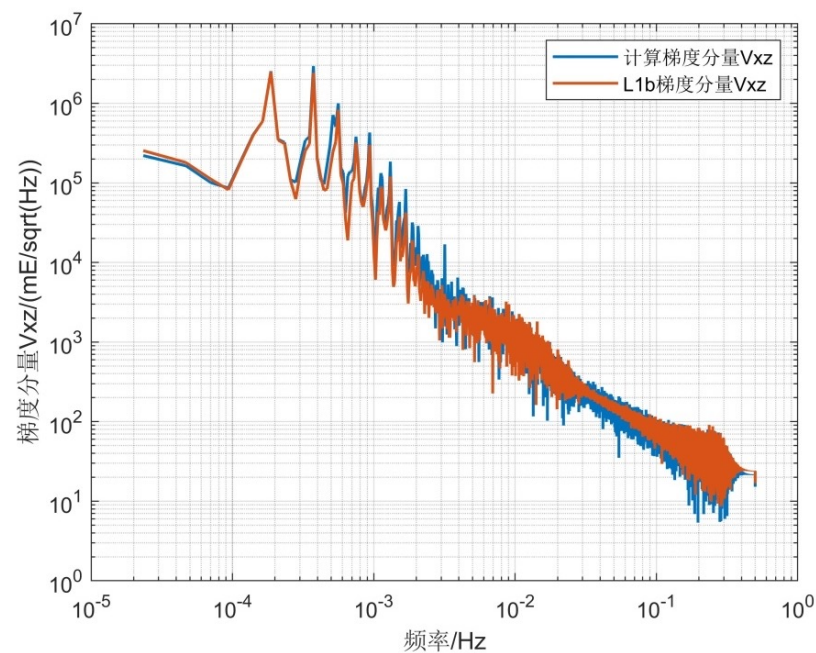
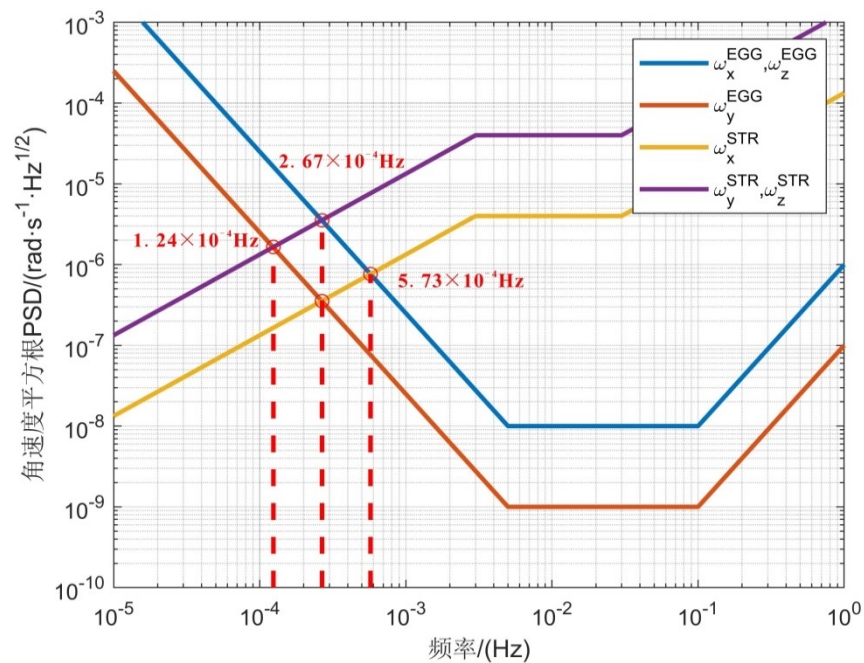
◆ L0数据处理



郭泽华等，武汉大学学报·信息科学版，2021；Yang et al, RS, 2021

2 重力卫星数据处理进展

◆ L0数据处理



吴云龙等，地球物理学报，2021

1 研究背景

2 重力卫星数据处理进展

2.1 L0数据处理技术

2.2 L1a数据精细处理

2.3 基于L1b数据的精细建模

3 TQ-2反演地球重力场

3.1 一组极轨模式

3.2 一组倾轨模式

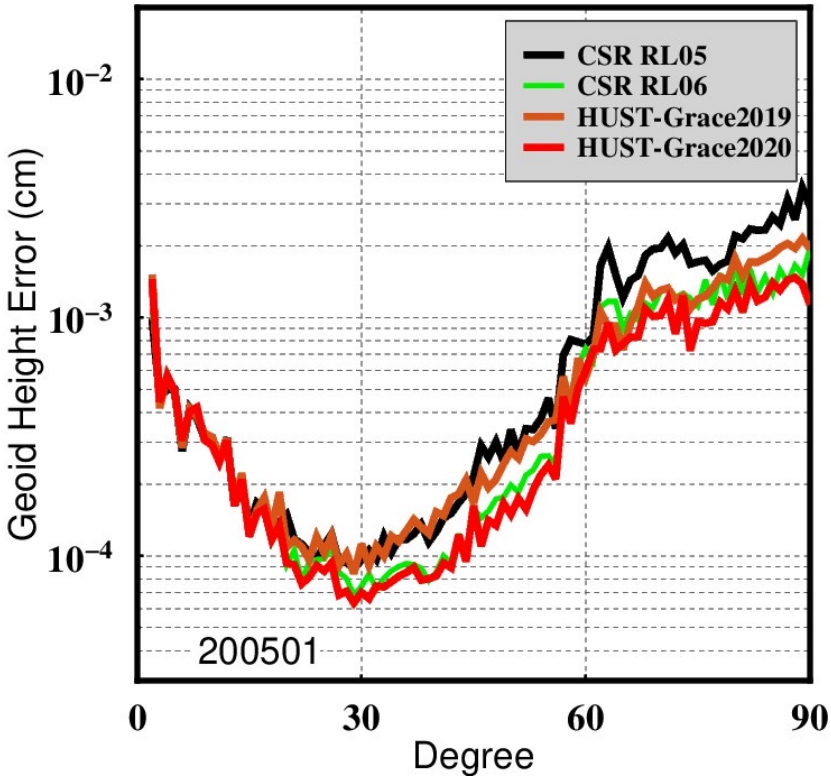
3.3 极轨+倾轨的组合模式

4 结论与展望

2 重力卫星数据处理进展

GRACE数据分级处理: L0 → L1a → L1b → L2

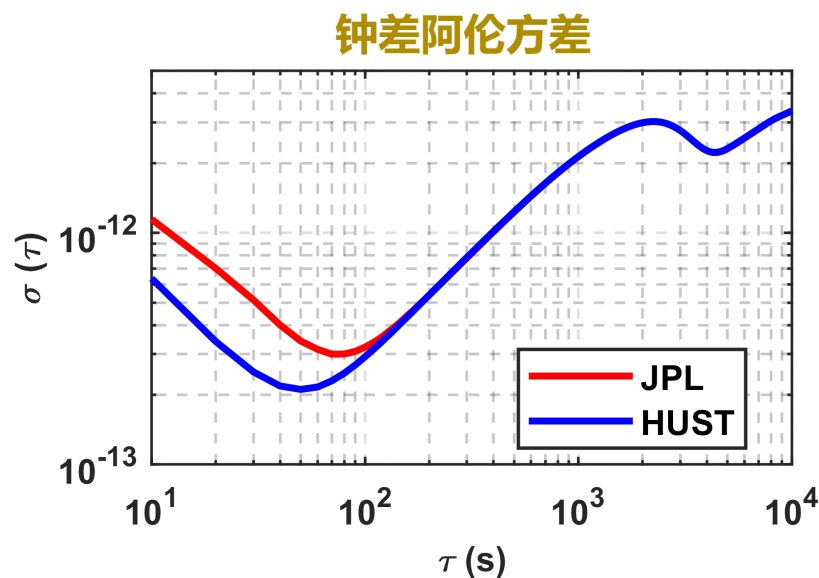
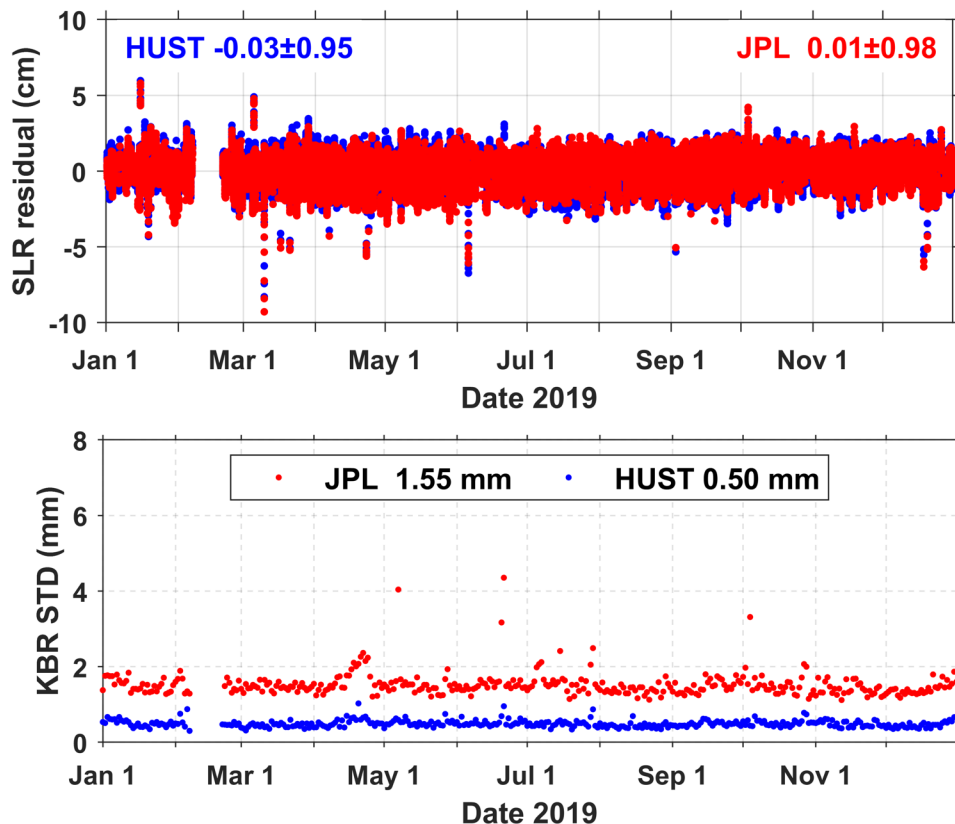
	HUST-Grace2019	HUST-Grace2020
轨道数据	ITSG	ITSG
星间数据	KBR1B, L1B RL02	KBR1B, L1B RL03
卫星姿态	SCA1B, L1B RL02	SCA1B, L1B RL03
加速度计	ACC1B, L1B RL02	ACC1B, L1B RL02
AOD	AOD1B RL05	AOD1B RL06



◆ HUST-Grace2020相比于HUST-Grace2019有明显的精度提升，主要源于去混频模型和L1a数据处理能力的提升

2 重力卫星数据处理进展

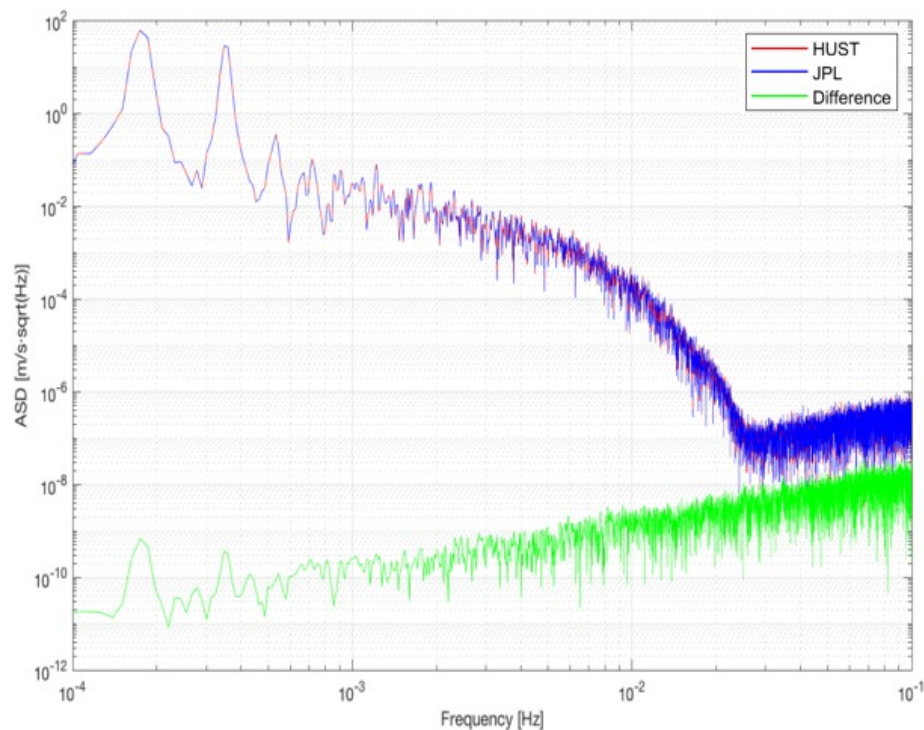
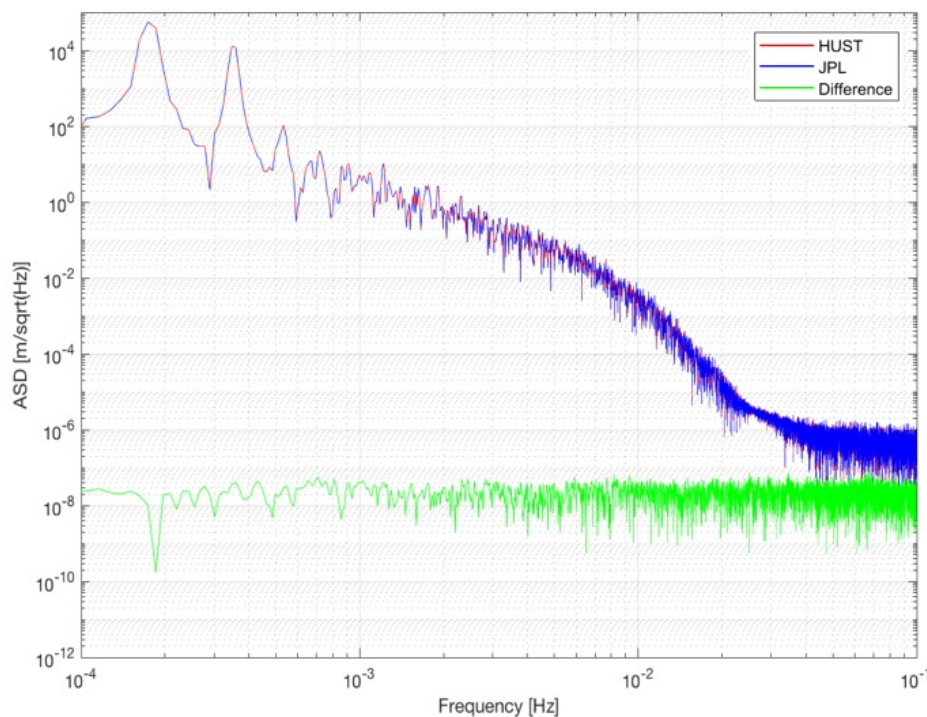
◆ L1a数据处理（卫星精密定轨）



◆ 攻克了不同差分模式GNSS载波相位模糊度固定以及抗差估计等难题，HUST精密轨道绝对精度与JPL相当(10个高性能SLR台站数据检核)，相对精度显著优于JPL（KBR测距检核），接收机钟差短稳优于JPL（Guo X, et al. 2020,2021,2022. GPSS. ASR.） 17

2 重力卫星数据处理进展

◆ L1a数据处理（星间观测数据）

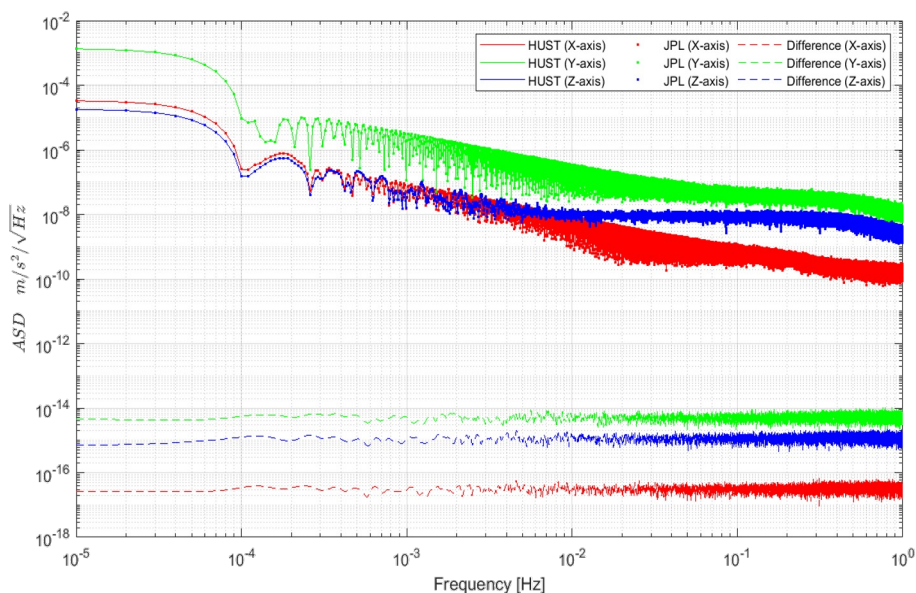


◆ 攻克了L1a星间数据处理难题，HUST现阶段研制的L1b数据产品精度与JPL官方发布数据精度相当（星间测距精度优于 $2\mu\text{m}$ ，星间距离变率优于 $0.2\mu\text{m/s}$ ）

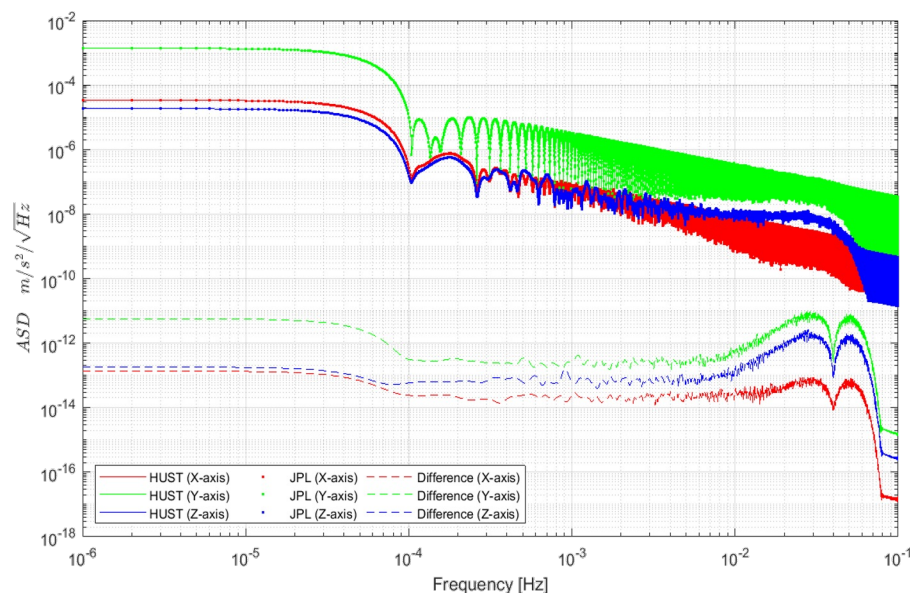
2 重力卫星数据处理进展

◆ L1a数据处理（加速度计观测数据）

ACT-1A 处理结果



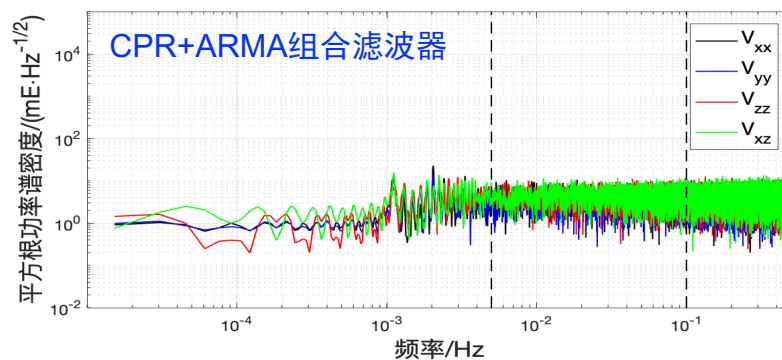
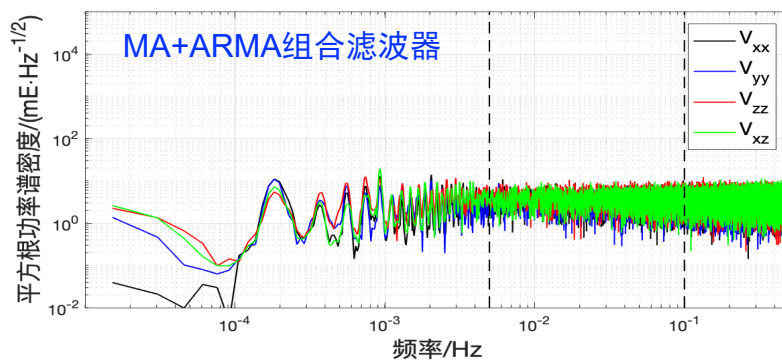
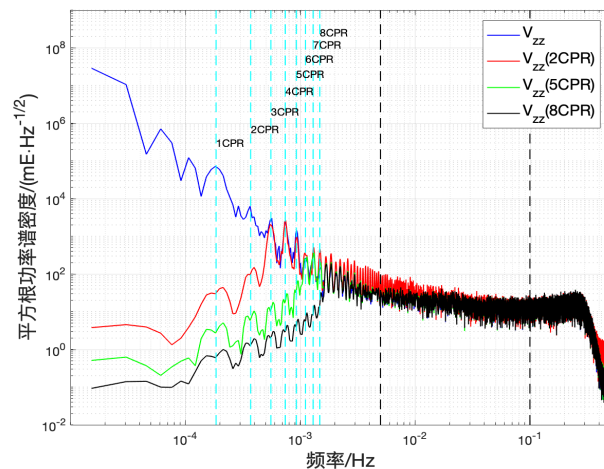
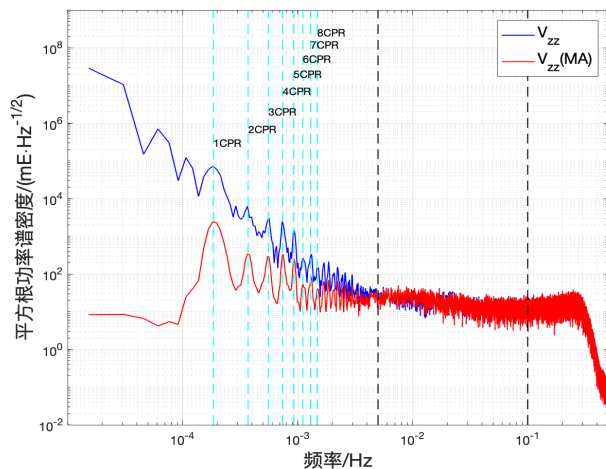
ACT-1B 处理结果



◆ 实现了L1a加速度计数据精细处理，HUST现阶段研制的L1b数据产品精度与JPL官方发布数据精度相当（优于 10^{-10} m/s^2 ）

2 重力卫星数据处理进展

◆ L1b数据处理（重力梯度观测数据）

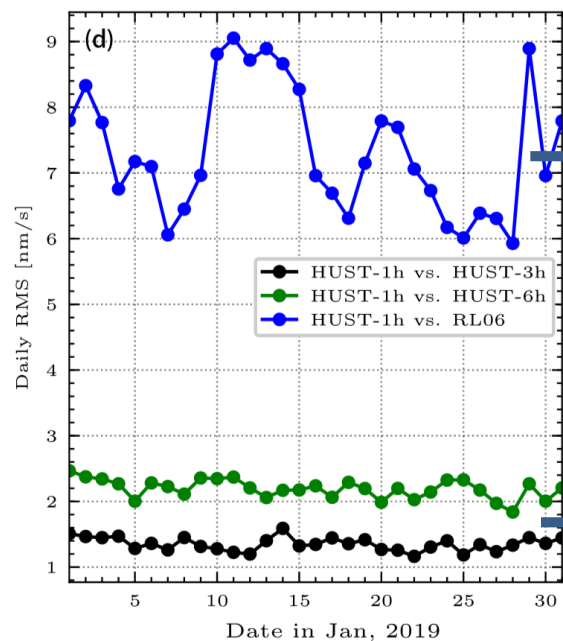
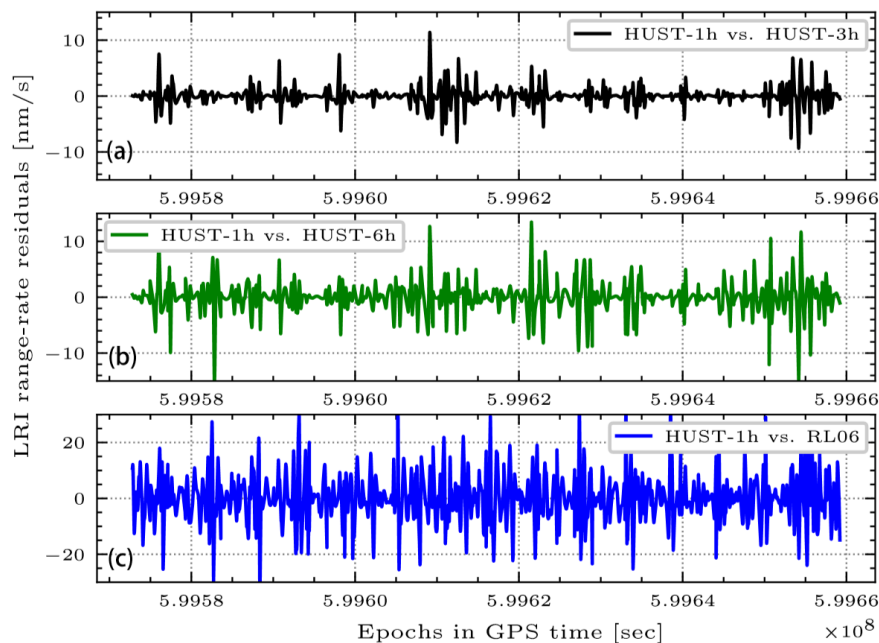


◆ 实现了L1a重力梯度数据精细处理，HUST现阶段研制的L1b数据产品精度与GOCE官方发布数据精度相当（优于10mE）

2 重力卫星数据处理进展

◆ 大气海洋去混频模型 (AOD1B)

Product	Data span	Time resolution	Data input	Algorithm	Maximal degree/order	Content
GFZ-RL06	1979~present	3 hours	ERA-interim and ECMWF	RL06	d/o 180	Atmosphere Ocean
HUST-ERA5	2002~present	1 hour	ERA5 reanalysis	Refined RL06	d/o 100	Atmosphere

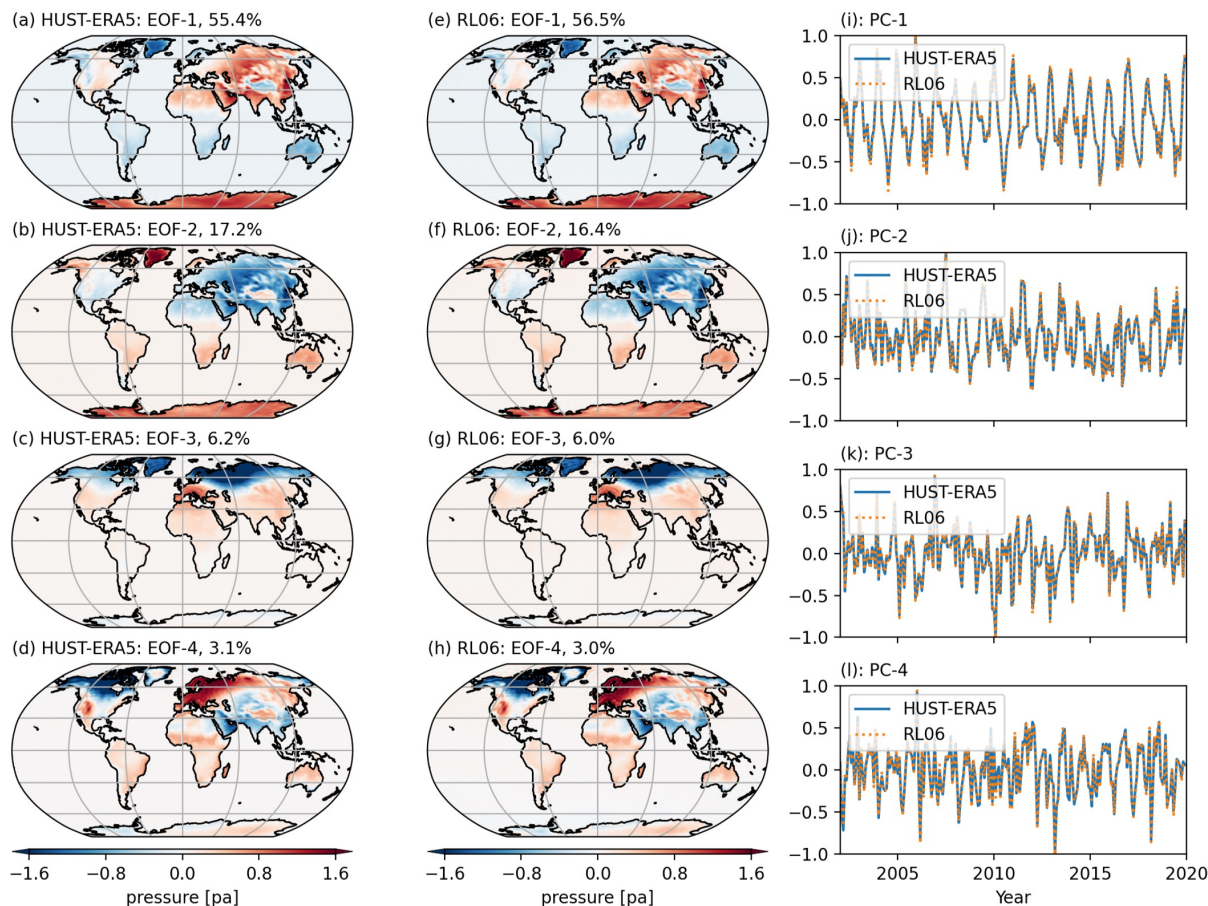


GFZ-RL06 VS
HUST-ERA5
7.34 nm/s in average

Effect of Temporal
Resolution (1.3 nm/s)

2 重力卫星数据处理进展

◆ 大气海洋去混频模型 (AOD1B)



自主研发了大气去混频产品
HUST-ERA5模型，相比于
GFZ最新发布的AOD RL06
 产品，时间分辨率**从3h提升**
至1h，可更加精确的模型化
 高频大气质量变化信息
 (Yang等, JGR, 2021)。

1 研究背景

2 重力卫星数据处理进展

2.1 L0数据处理技术

2.2 L1a数据精细处理

2.3 基于L1b数据的精细建模

3 TQ-2反演地球重力场

3.1 一组极轨模式

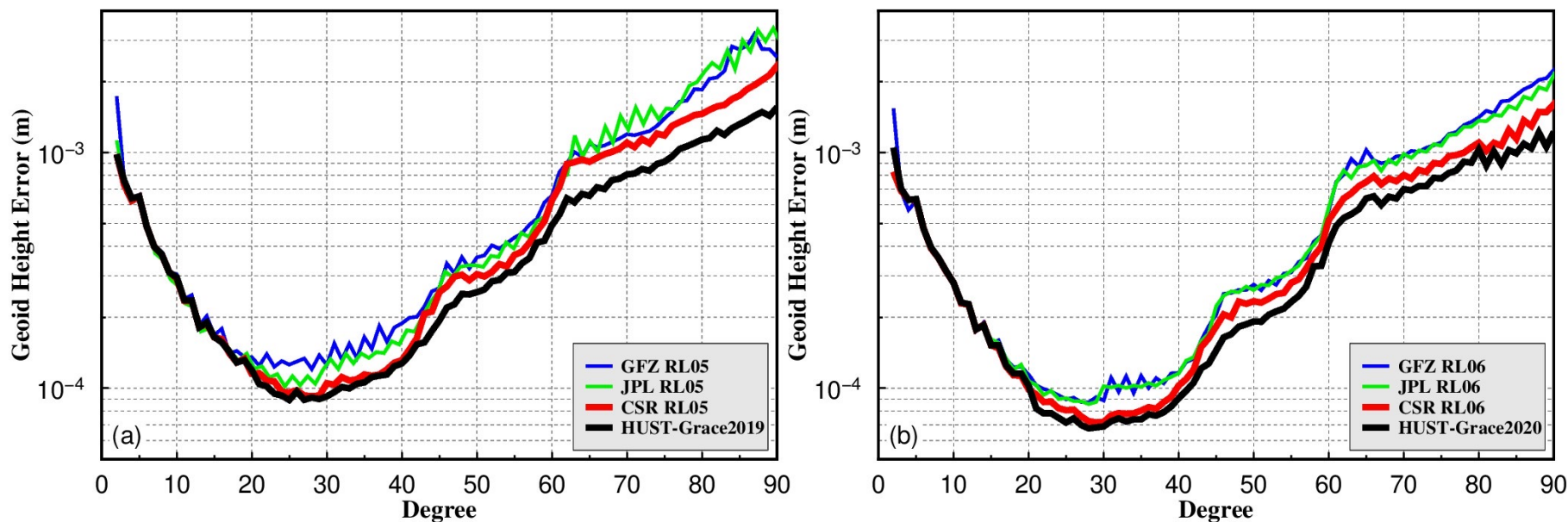
3.2 一组倾轨模式

3.3 极轨+倾轨的组合模式

4 结论与展望

2 重力卫星数据处理进展

◆ 基于L1b数据的精细建模



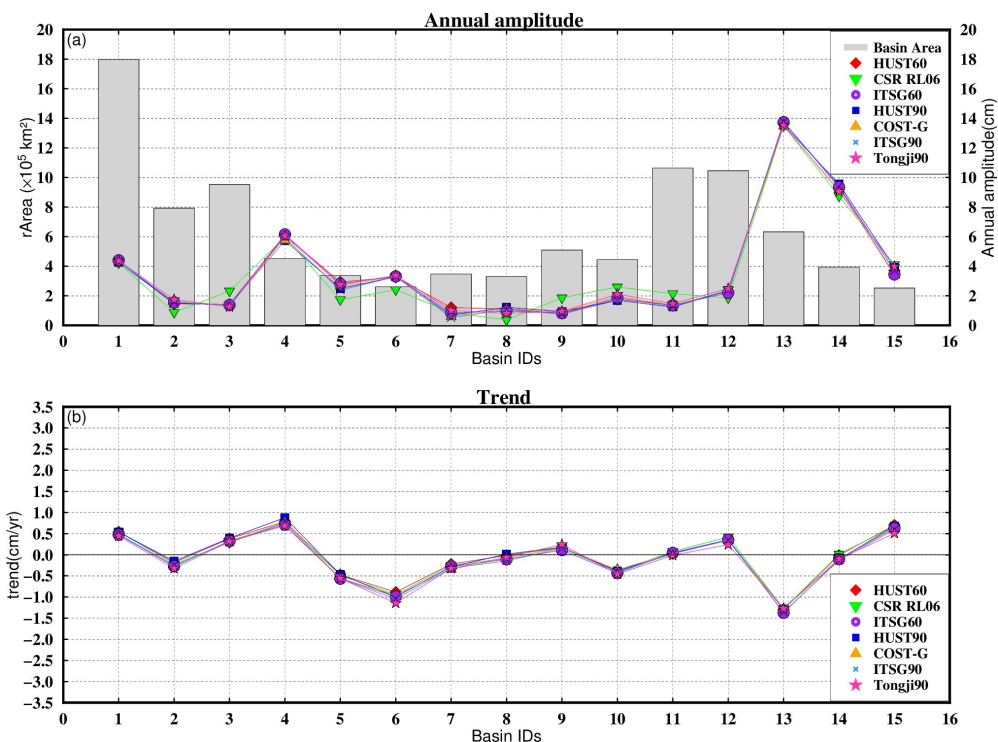
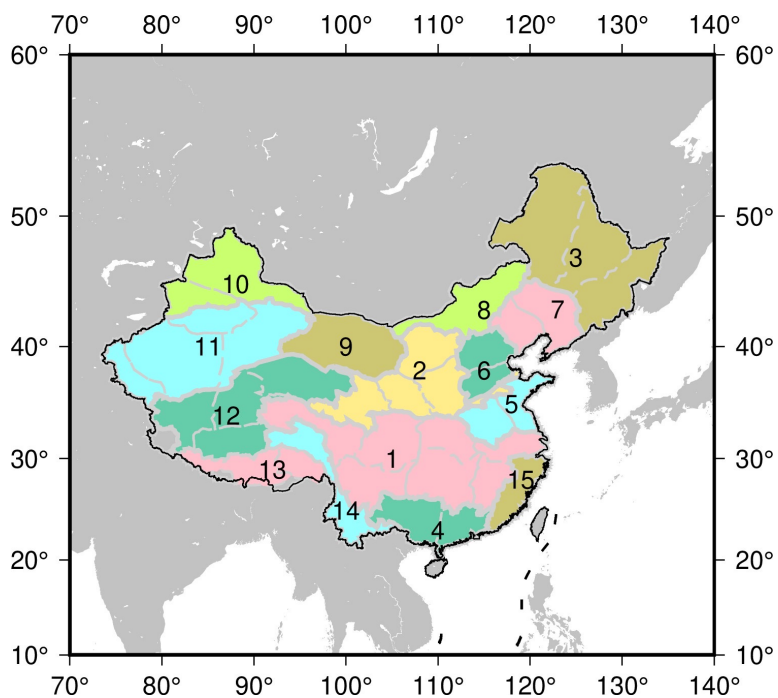
时变重力场模型 (a) HUST-Grace2019和 (b) HUST-Grace2020

◆ 采用改进的动力学法 (Zhou等, JGR, 2018, 2019), 解算的HUST-Grace2020模型精度优于GRACE官方机构最新发布的第六代产品 (RL06)

2 重力卫星数据处理进展

◆ 基于L1b数据的精细建模

基于HUST-Grace2020模型的中国大陆区域水储量变化特征研究



◆ HUST-Grace2020 模型计算的结果与 COST-G、ITSG、Tongji 等产品结果的一致性好，具备估算中国大陆区域陆地水储量变化的能力。

2 重力卫星数据处理进展

◆ 基于L1b数据的精细建模

表 2 各种时变重力场模型计算的 2005—2010 年间撒哈拉沙漠和中太平洋地区的质量变化统计/cm

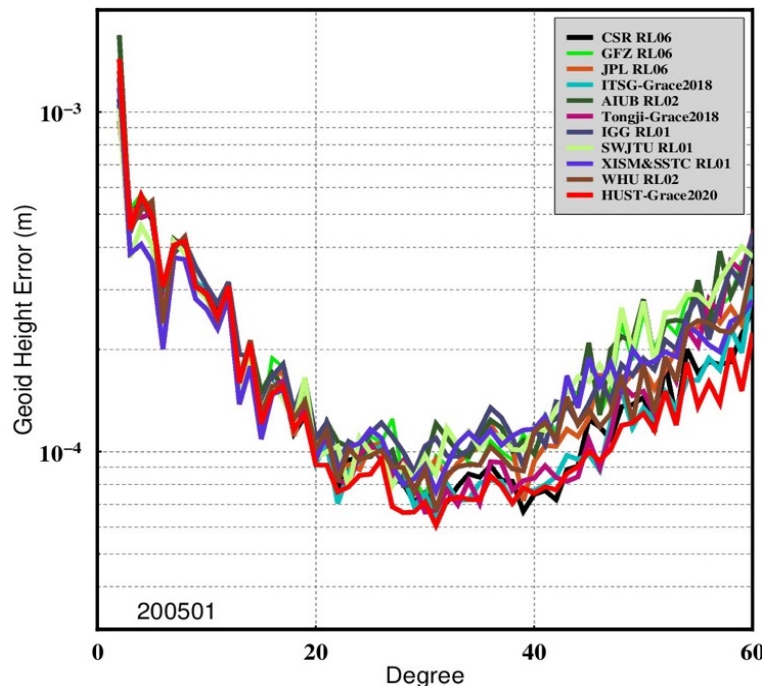
模型	撒哈拉沙漠			中太平洋地区		
	最大值	最小值	RMS	最大值	最小值	RMS
CSR RL06	4.12	−4.25	1.69	3.41	−2.95	1.51
JPL RL06	4.36	−3.93	1.77	3.34	−3.38	1.44
GFZ RL06	3.89	−4.92	1.86	4.41	−4.31	1.82
ITSG-GRACE2018s	4.04	−3.65	1.47	3.12	−2.57	1.29
ITG-GRACE2010	6.06	−5.36	2.61	4.65	−6.27	2.32
LUH-GRACE2018	9.88	−6.77	3.31	5.74	−7.60	2.53
Tongji-Grace2018	5.08	−4.62	1.80	2.70	−3.50	1.47
HUST-Grace2020	4.54	−4.12	1.56	3.34	−2.60	1.43
IGG RL01	6.01	−5.28	2.21	4.36	−4.88	2.00
SWJTU-GRACE-RL01	4.67	−4.77	1.89	3.21	−2.95	1.38
SWPU-GRACE2021	4.38	−4.66	1.99	3.99	−3.30	1.62
WHU-GRACE-GPD01s	4.53	−3.62	1.72	2.98	−3.21	1.39

◆ 国内机构研制的 HUST-Grace2020、Tongji-Grace2018 和 WHU-GRACE-GPD01s 等 系列模型与官方机构发布的模型(即 CSR RL06、JPL RL06 和 GFZ RL06)的精度水平相当，甚至更优。

2 重力卫星数据处理进展



ICGEM收录情况



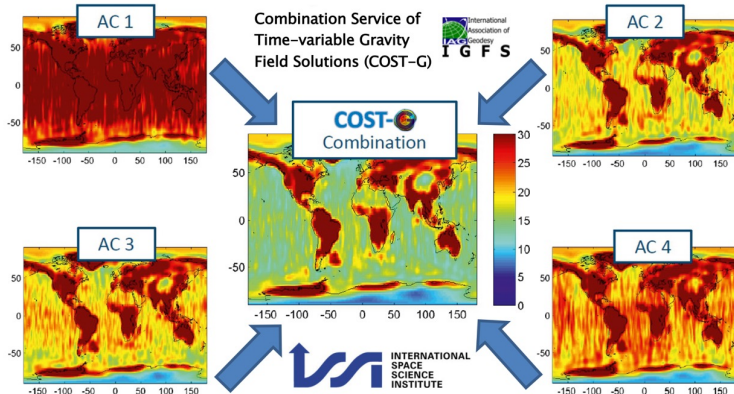
模型精度比对情况

◆ HUST-Grace2020模型已被国际地球重力场模型中心ICGEM收录（Zhou et al., 2020），欢迎下载使用。

◆ http://icgem.gfz-potsdam.de/series/03_GRACE_other/HUST/HUST-Grace2020

2 重力卫星数据处理进展

Combination of GRACE Gravity Fields



时变重力场模型综合服务COST-G
(the Combination Service for Time-variable Gravity Field Solutions)



COST-G Meeting
Bern, 13 – 17 January, 2020

联合多家机构解算结果，进一步提高重力场模型精度和可靠性！



1 研究背景

2 重力卫星数据处理进展

2.1 L0数据处理技术

2.2 L1a数据精细处理

2.3 基于L1b数据的精细建模

3 TQ-2反演地球重力场

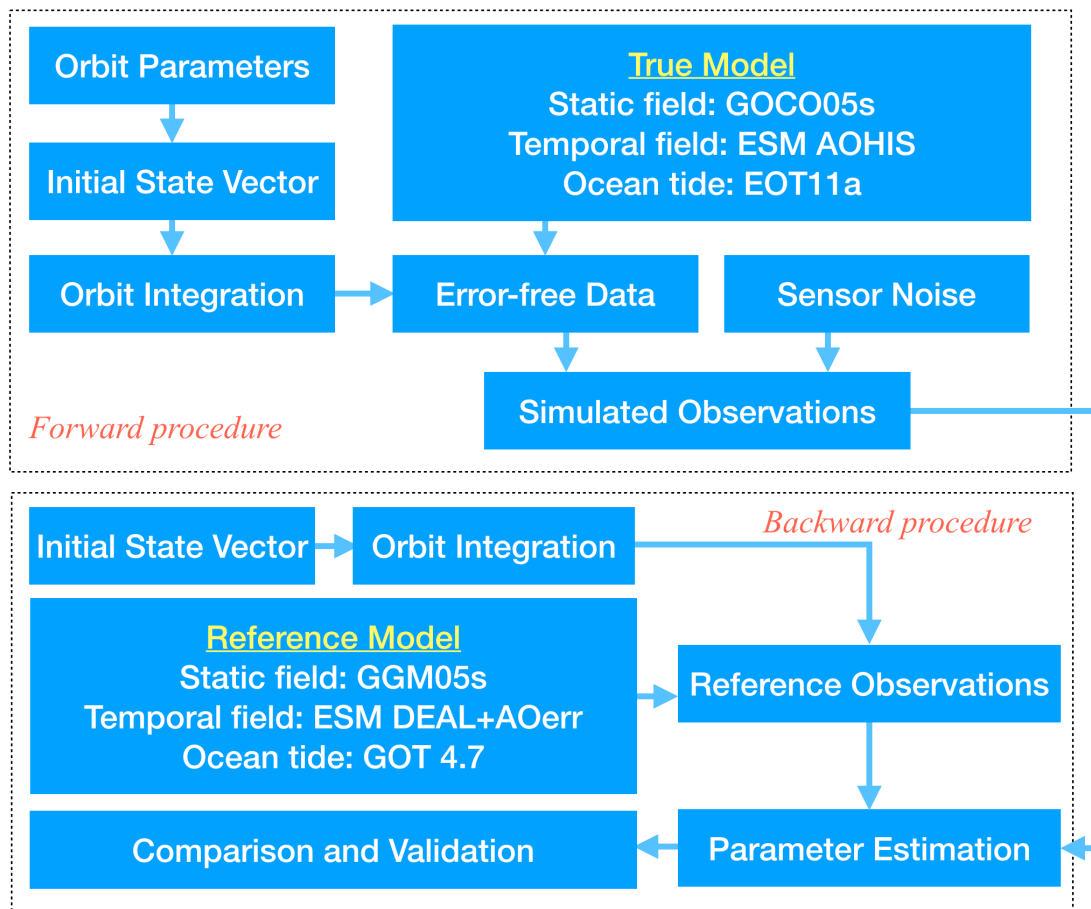
3.1 一组极轨模式

3.2 一组倾轨模式

3.3 极轨+倾轨的组合模式

4 结论与展望

3 TQ-2反演地球重力场



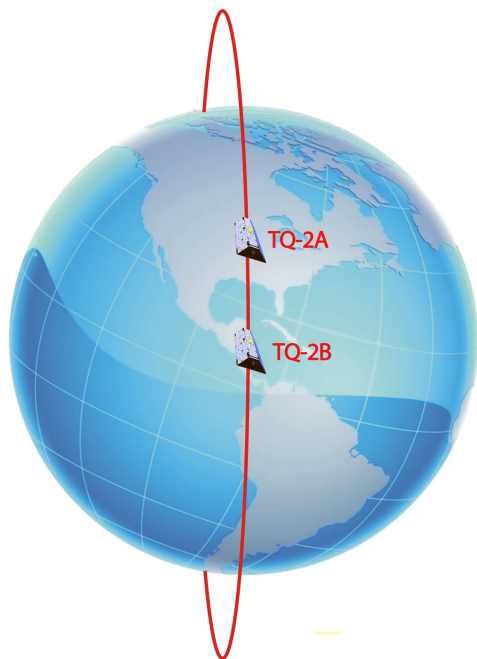
正演过程

反演过程

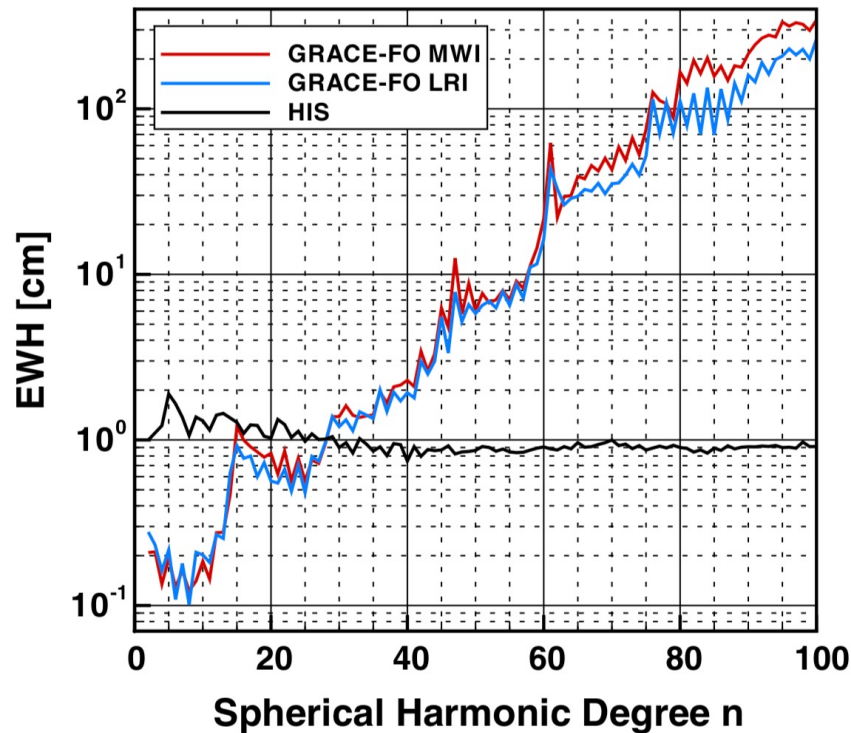
模拟计算流程图

- ◆ “真实”信号确切已知
- ◆ 反演过程中可加入载荷噪声、背景力模型噪声

3.1 一组极轨模式



南北跟踪模式



GRACE Follow-On卫星模拟结果

引自Flechtner等 (2016)

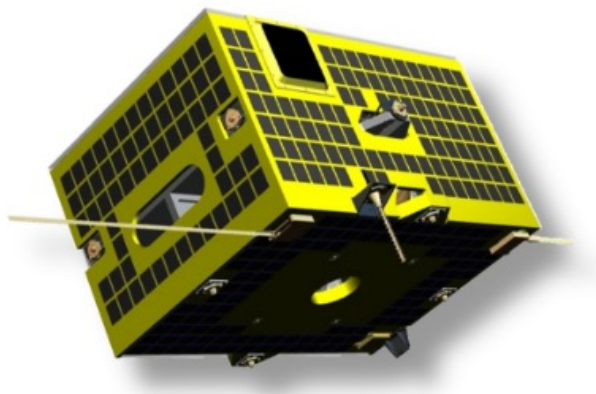
- ◆ 在一组极轨模式下，采用激光测距系统提升时变重力场监测能力有限

3.1 一组极轨模式

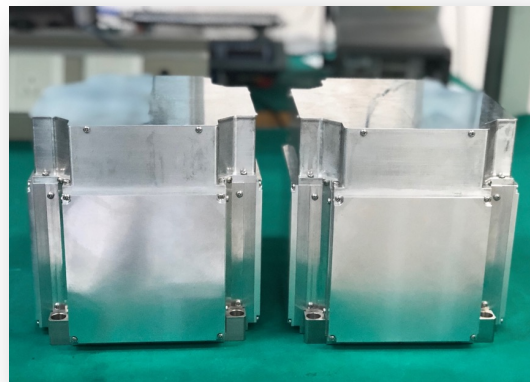
	GRACE	GFO	TQ-2（1组）
激光测距	1 μ m/sqrt(Hz) @0.01Hz	50nm/sqrt(Hz) @0.01Hz	20nm/sqrt(Hz) @0.01Hz
加速度计	10 ⁻¹⁰ m/s ² @1-100mHz	10 ⁻¹⁰ m/s ² @1-100mHz	5*10 ⁻¹² m/s ² @1-100mHz
定轨精度	5cm	5cm	5cm
轨道高度	500 km	500 km	500 km
轨道倾角	89°	89°	89°
星间距离	220km	220km	100km

3.1 一组极轨模式

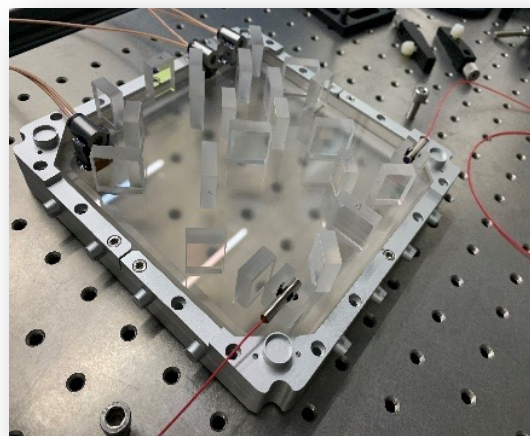
◆ 硬件制备能力



天琴一号卫星

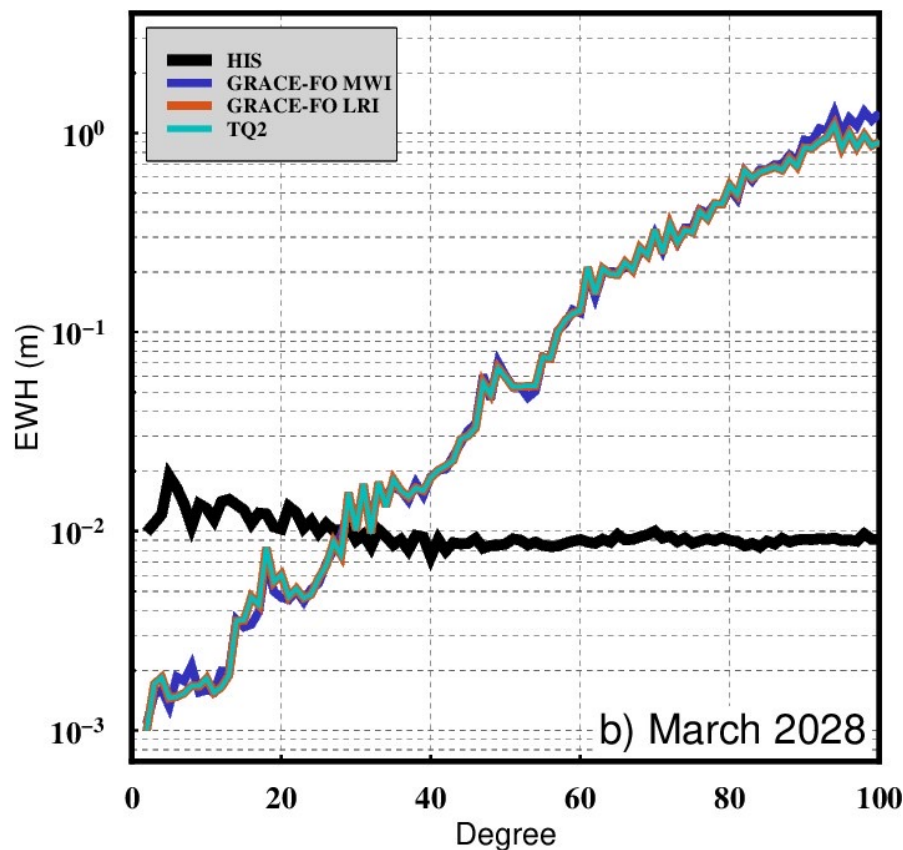
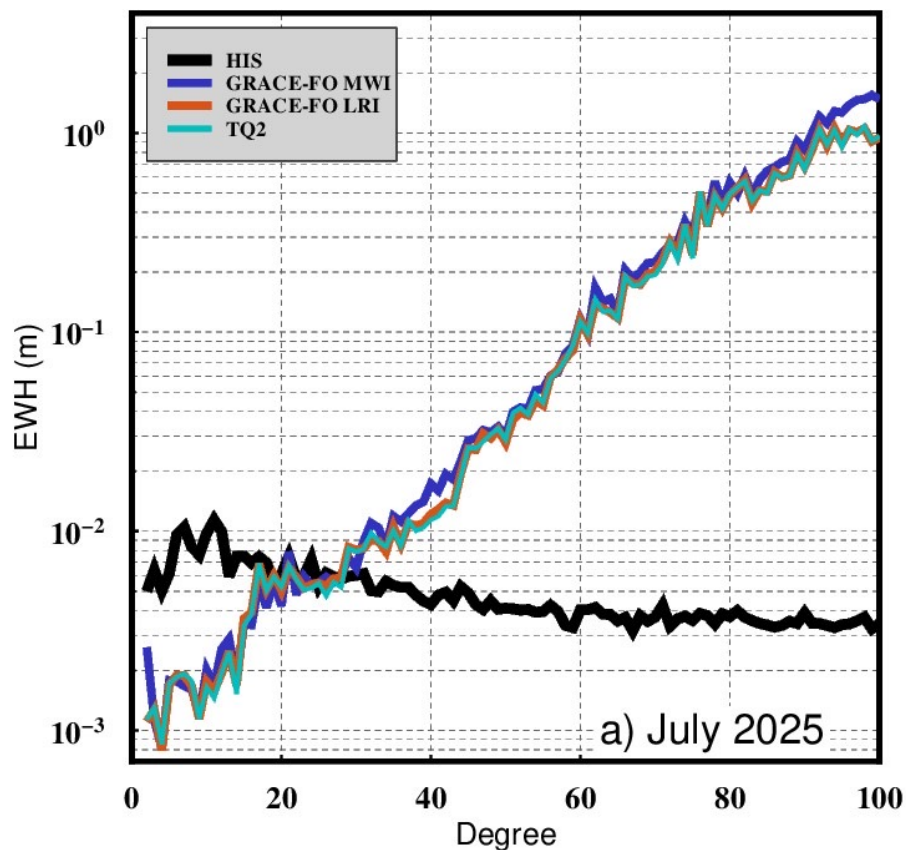


加速度计（高灵敏轴精度优于 10^{-11}m/s^2 ）



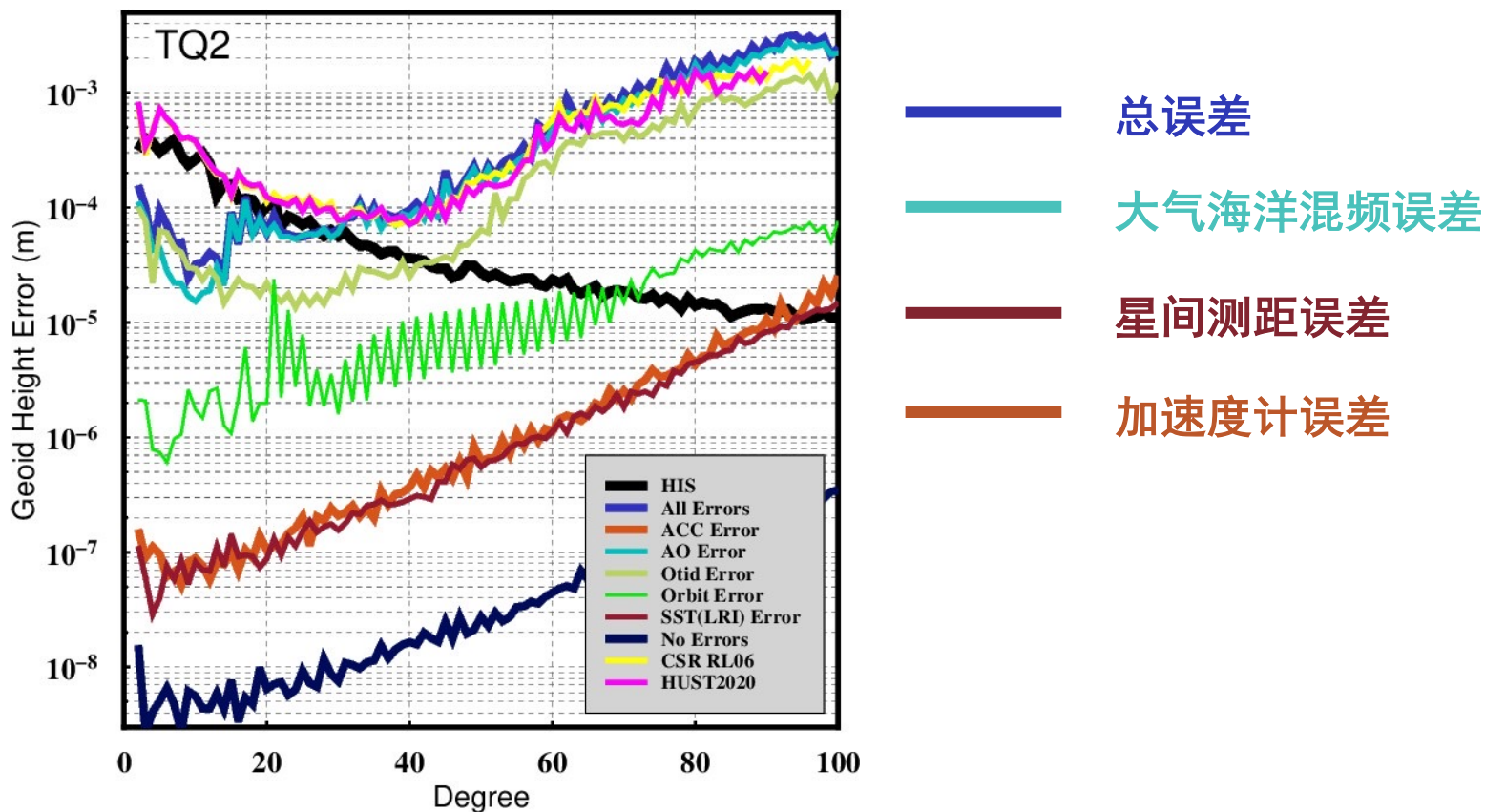
激光测距系统（位移测量分辨率优于 1nm ）

3.1 一组极轨模式



◆ 相比于微波测距（如**GRACE**或**GRACE Follow-On**的微波测距系统）结果，即使引入**更高精度**的观测载荷，时变重力场的精度提升幅度**较小**

3.1 一组极轨模式



不同误差源对重力场反演的贡献

◆ 在极轨观测模式下，大气海洋混频误差仍然是主要误差源，即使提升载荷精度水平，仍然难以大幅提升地球重力场观测精度。

1 研究背景

2 重力卫星数据处理进展

2.1 L0数据处理技术

2.2 L1a数据精细处理

2.3 基于L1b数据的精细建模

3 TQ-2反演地球重力场

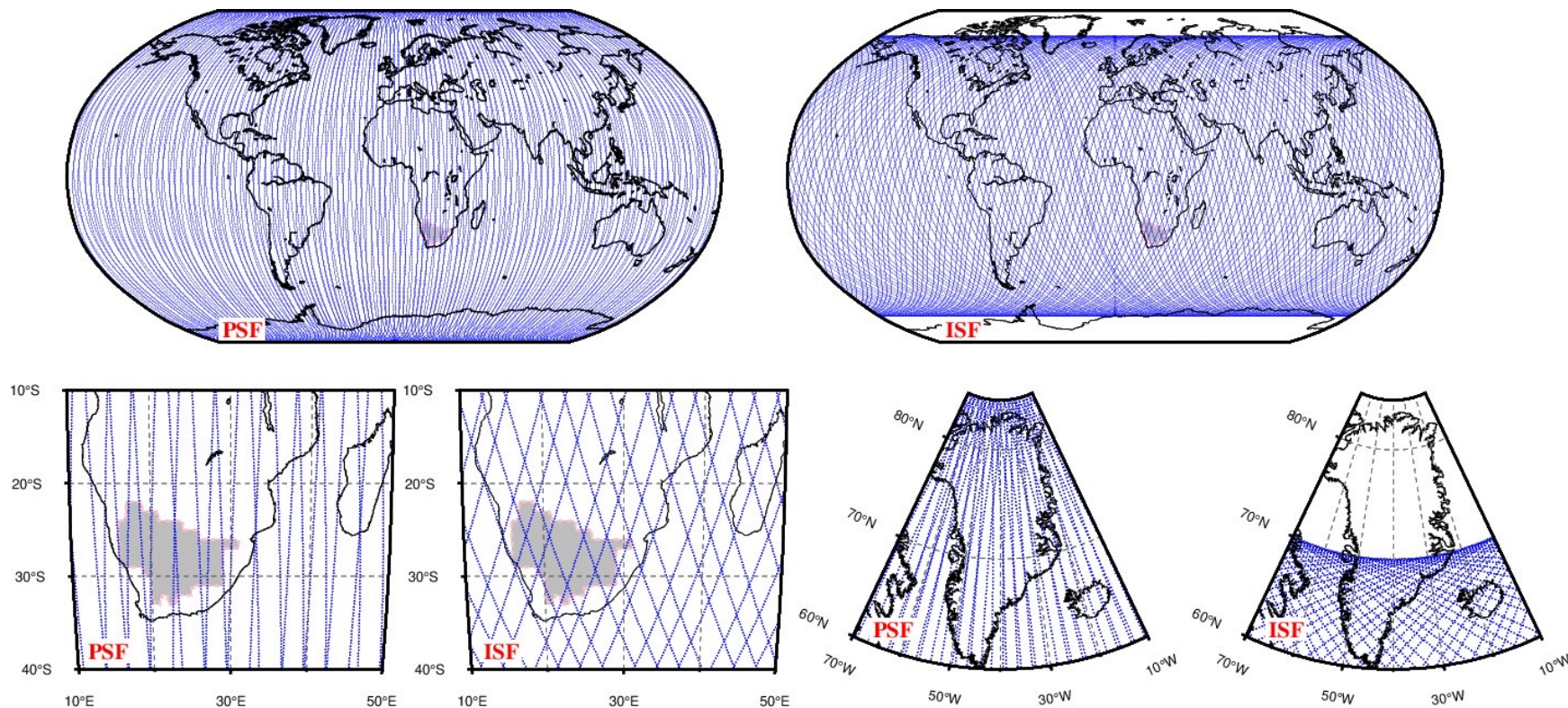
3.1 一组极轨模式

3.2 一组倾轨模式

3.3 极轨+倾轨的组合模式

4 结论与展望

3.2 一组倾轨模式



- ◆ 一组倾斜轨道在**两极地区**没有观测数据
- ◆ 一组倾斜轨道在**有效观测区域**的观测数据更为密集，且可以引入更多的**东西向**观测信息

3.2 一组倾轨模式

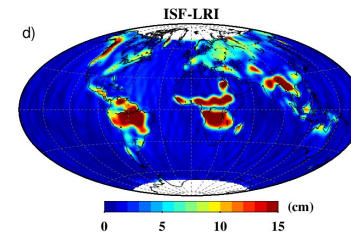
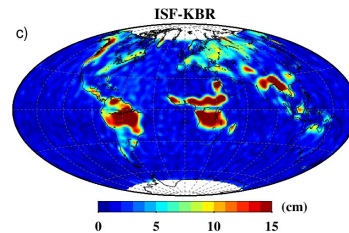
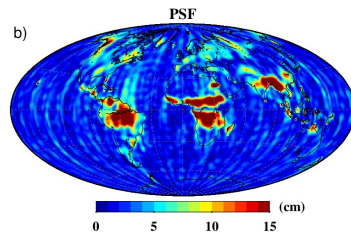
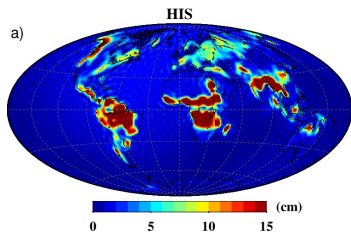
原始信号

极轨 (KBR)

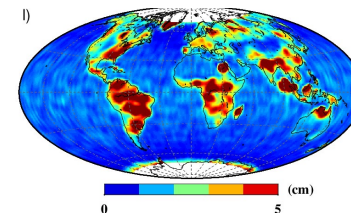
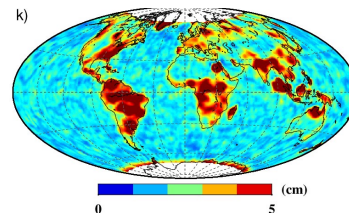
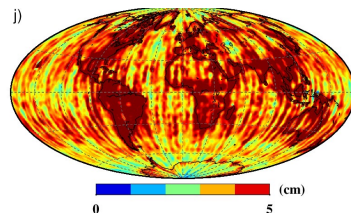
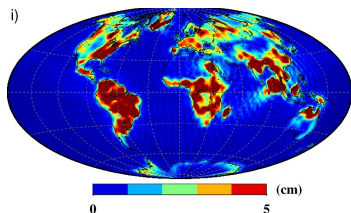
倾轨 (KBR)

倾轨 (LRI)

时变信号



时变噪声



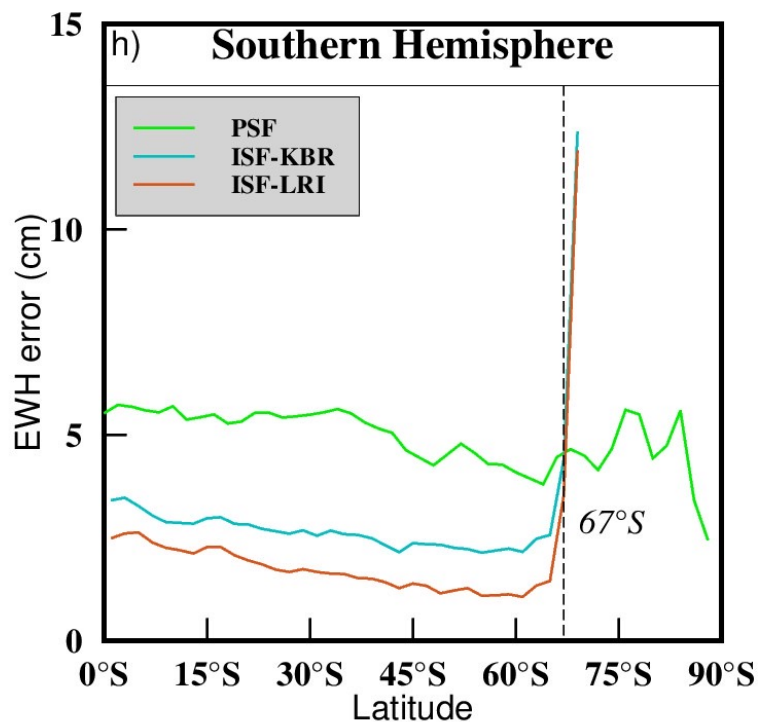
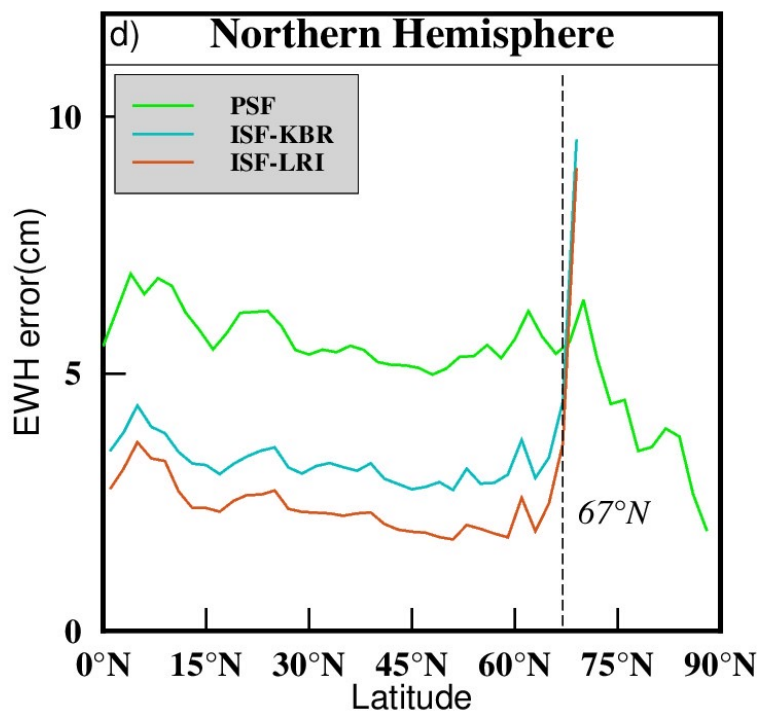
3.87 cm

1.93 cm

1.11 cm

- ◆ 一组倾斜轨道能够探测观测区域内的时变信号
- ◆ 一组倾斜轨道在有效观测区域探测时变信号的能力更强

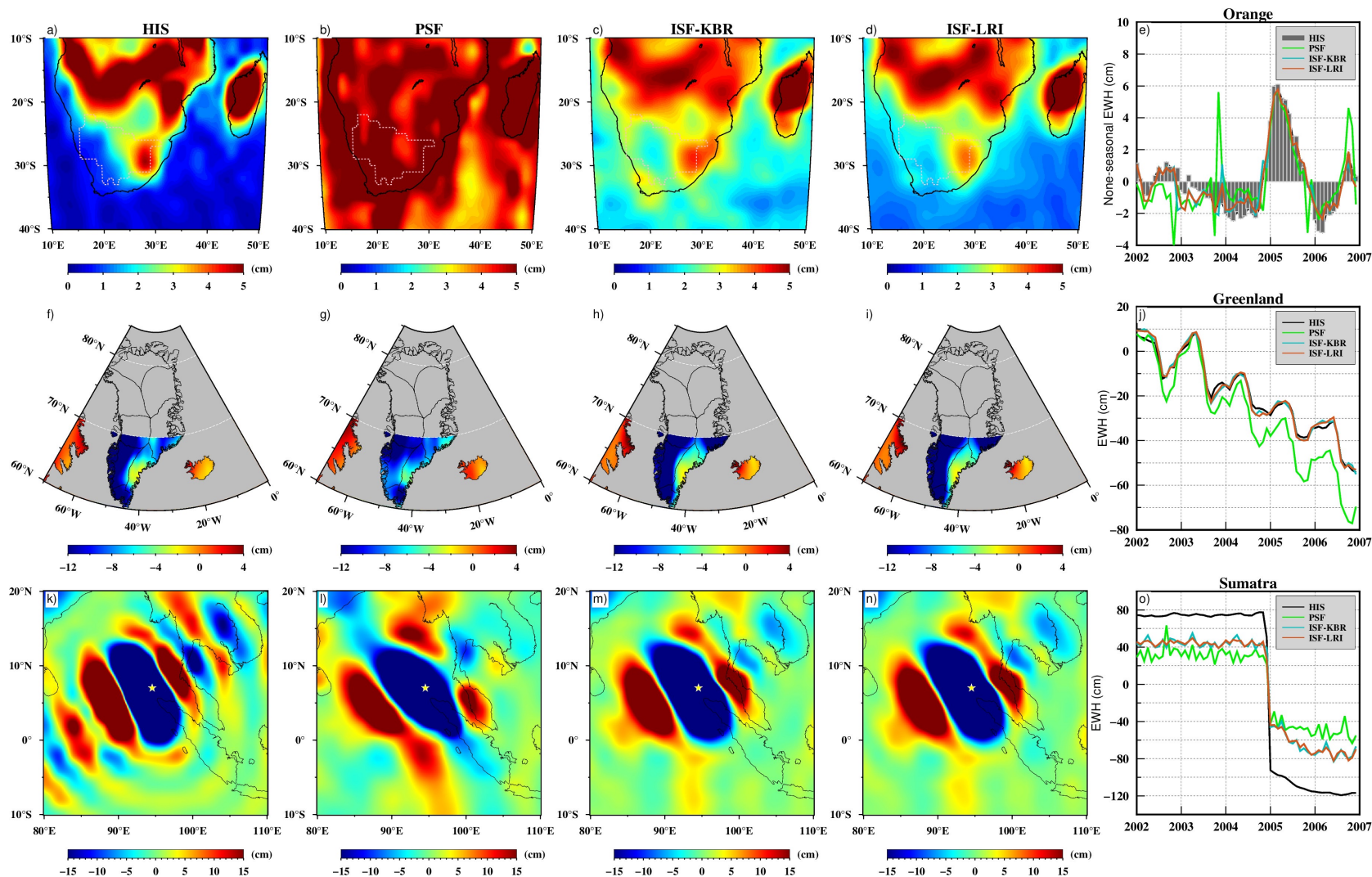
3.2 一组倾轨模式



南北半球时变噪声随纬度的统计值

- ◆ 倾斜轨道在有效观测区域探测时变信号的能力 **更强**
- ◆ 利用**激光测距系统**，能够进一步提高时变信号探测能力

3.2 一组倾轨模式



◆ 在可观测区域内，倾斜轨道提取的时变信号分辨率更高

1 研究背景

2 重力卫星数据处理进展

2.1 L0数据处理技术

2.2 L1a数据精细处理

2.3 基于L1b数据的精细建模

3 TQ-2反演地球重力场

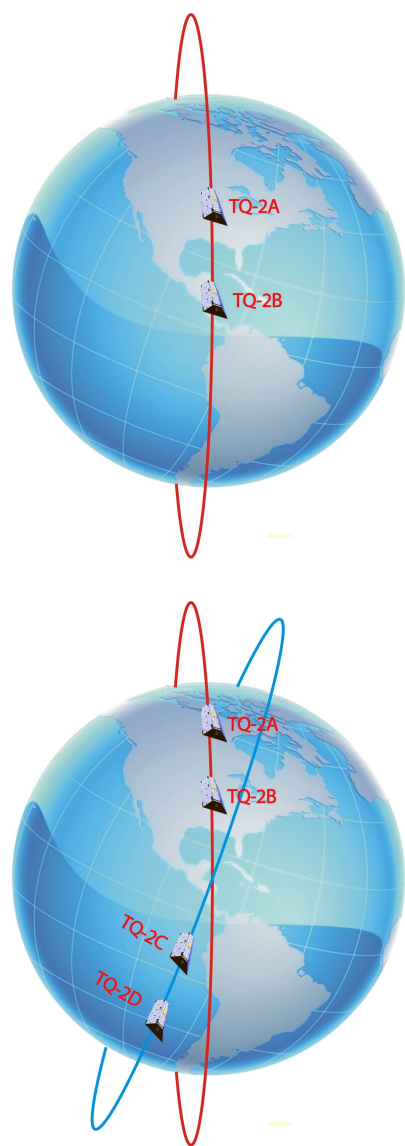
3.1 一组极轨模式

3.2 一组倾轨模式

3.3 极轨+倾轨的组合模式

4 结论与展望

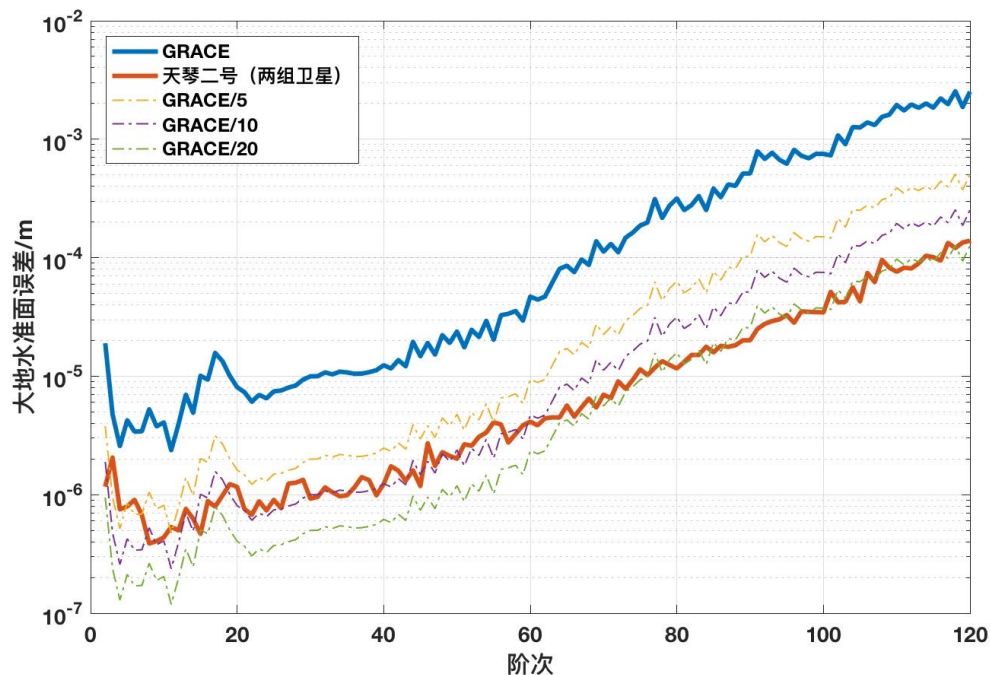
3.3 极轨+倾轨的组合模式



	GRACE	GFO	TQ-2（1组）	TQ-2（2组）
激光测距	1 μ m/sqrt(Hz) @0.01Hz	50nm/sqrt(Hz) @0.01Hz	20nm/sqrt(Hz) @0.01Hz	20nm/sqrt(Hz) @0.01Hz
加速度计	10 ⁻¹⁰ m/s ² @1-100mHz	10 ⁻¹⁰ m/s ² @1-100mHz	10 ⁻¹¹ m/s ² @1-100mHz	10 ⁻¹¹ m/s ² @1-100mHz
定轨精度	5cm	5cm	5cm	5cm
轨道高度	500 km	500 km	500 km	500 km
轨道倾角	89°	89°	89°	89°（第一组） 70°（第二组）
星间距离	220km	220km	100km	100km

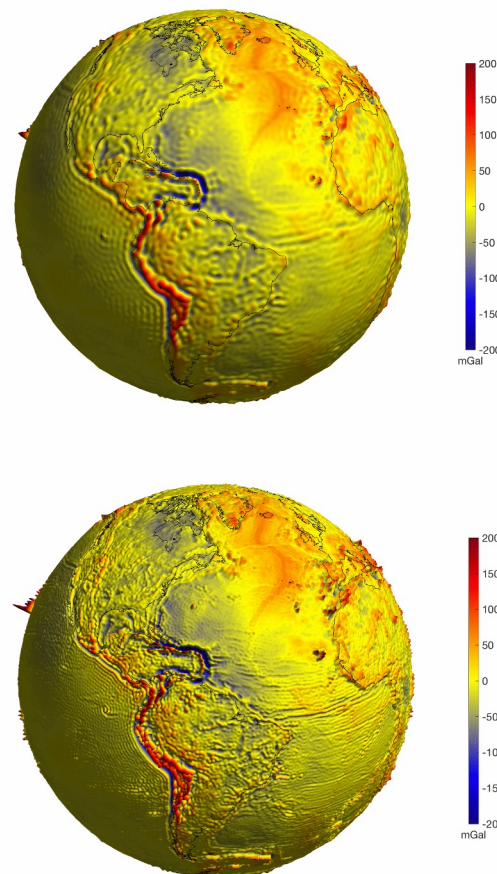
3.3 极轨+倾轨的组合模式

高精度静态重力场模型



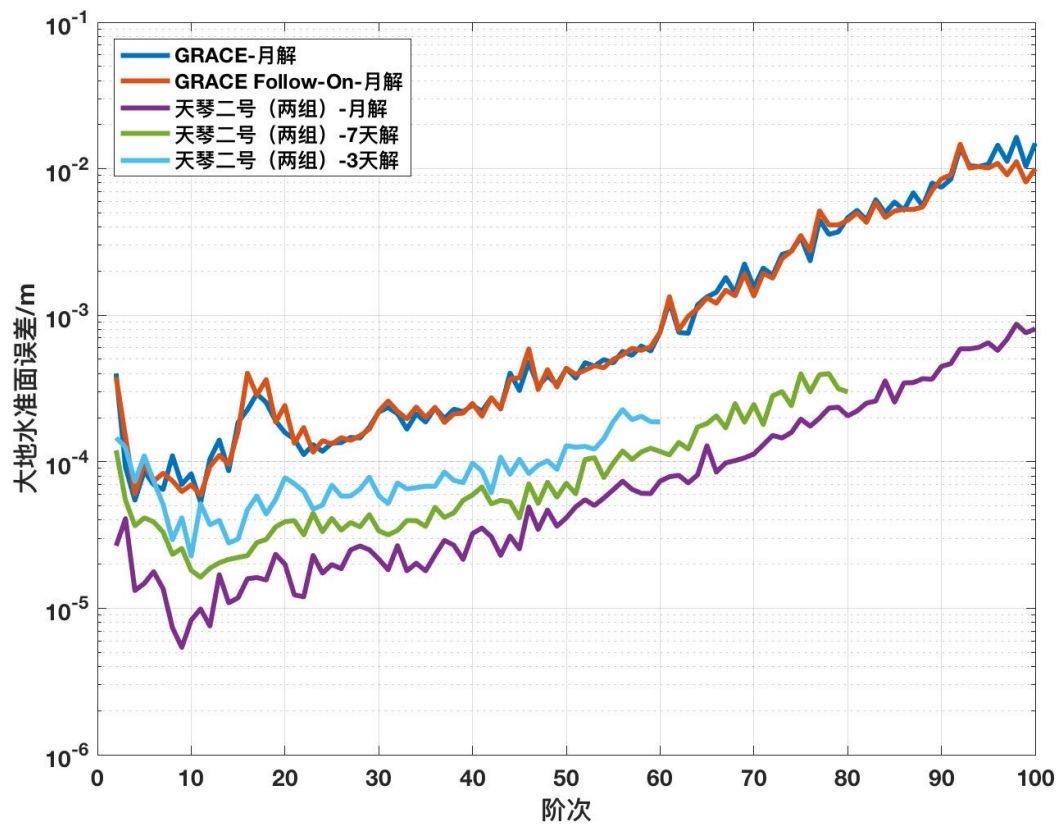
天琴二号卫星反演静态重力场的能力

- ◆ 在60阶次前（约333km空间分辨率）提升约**10**倍
- ◆ 在60阶次至120阶次（约333km~166km空间分辨率）提升约**20**倍



3.3 极轨+倾轨的组合模式

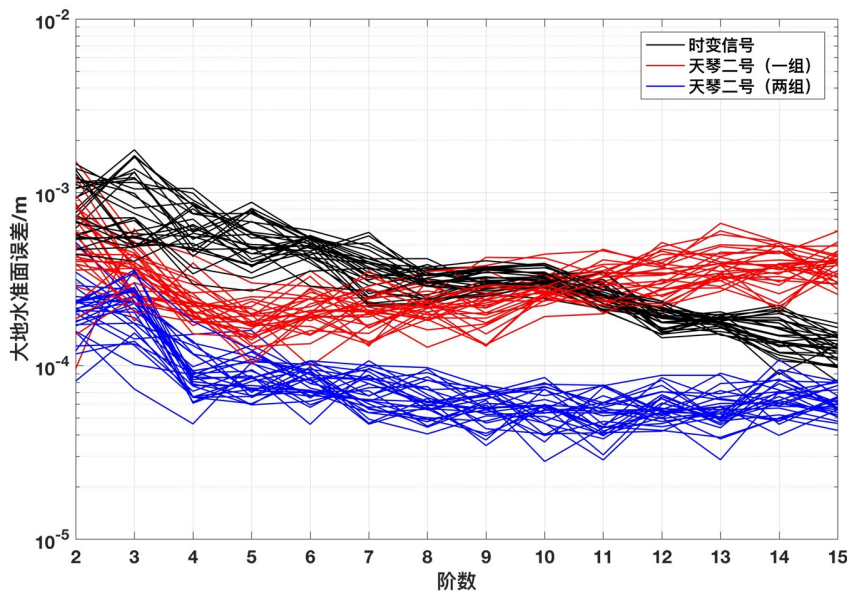
高精度时变重力场模型



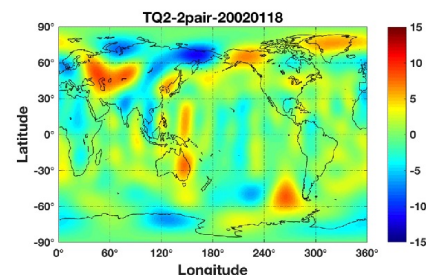
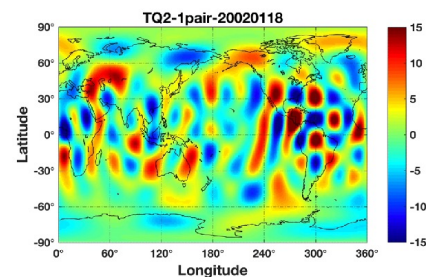
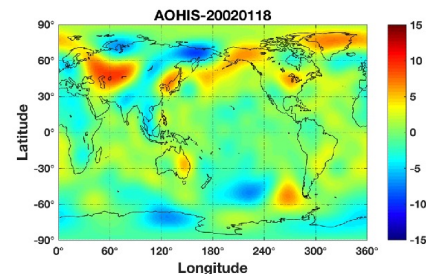
◆ 天琴二号具备利用短时间
(3天或1周) 观测数据探测重力场时变信号的能力, 表明两组天琴二号卫星可显著提升时变重力场的时间分辨率。

3.3 极轨+倾轨的组合模式

监测大气海洋质量变化



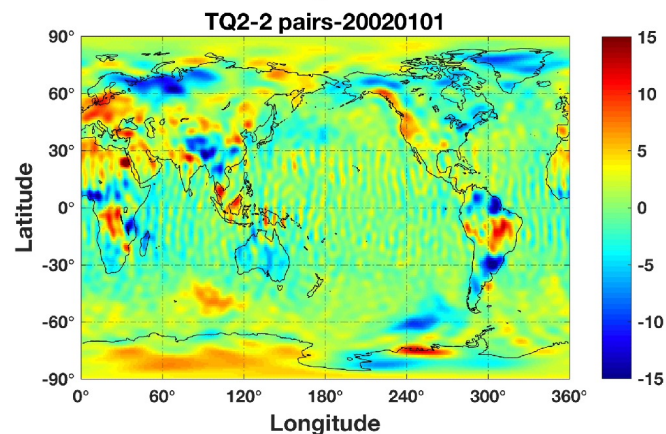
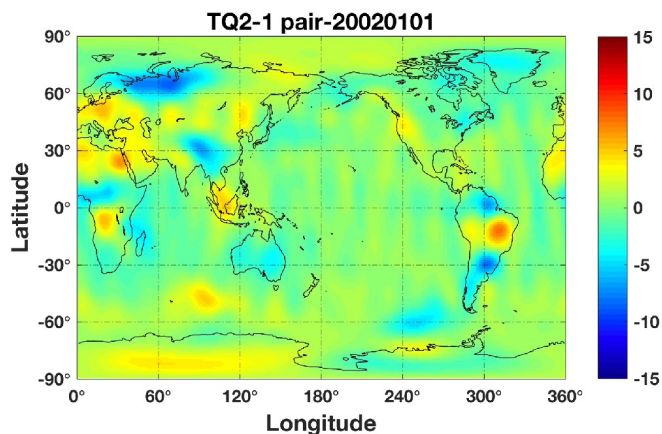
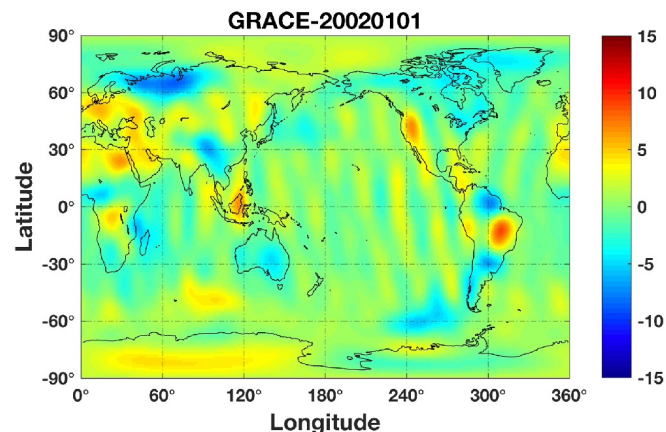
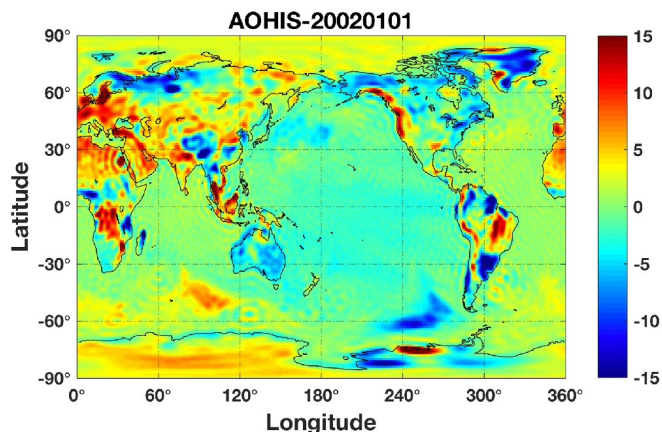
- ◆ 利用**1天**的卫星观测数据可解算时变重力场，其大地水准面精度优于**0.1mm@1500km**。
- ◆ 利用天琴二号单组卫星难以获取高频的大气海洋质量变化信息，而采用**两组卫星**能够观测到这部分信号。



□ 在大气科学领域，有望首次监测高时间分辨率的大气质量变化特性

3.3 极轨+倾轨的组合模式

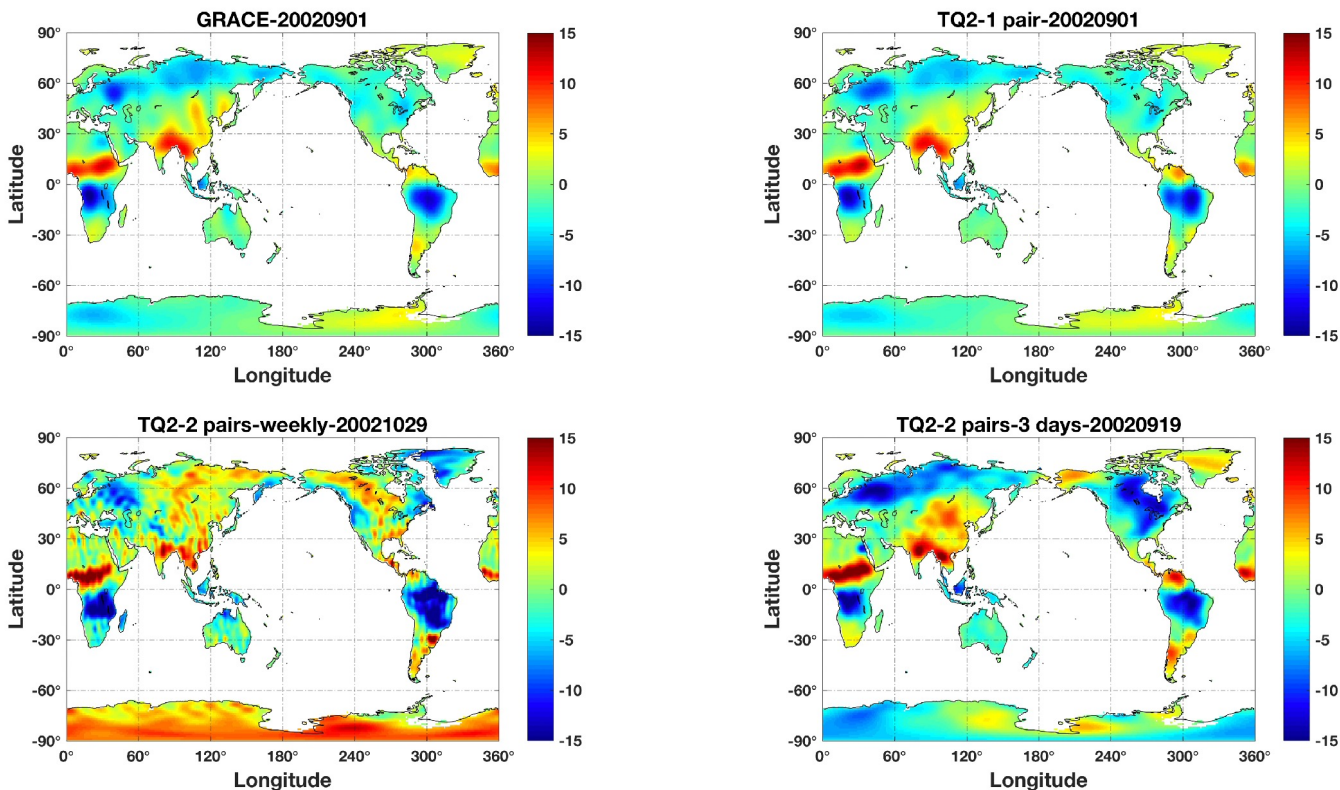
高空间分辨率



- ◆ 利用天琴二号两组卫星可以显著提高时变重力场的提取能力，每月时变重力场模型的空间分辨率约为**200km**（GRACE卫星月重力场模型的空间分辨率约为**300km**）。

3.3 极轨+倾轨的组合模式

高时间分辨率



- ◆ 采用**1星期**数据解算的时变重力场精度优于采用**1个月**GRACE卫星数据解算的时变重力场。
- ◆ **1星期**数据解算时变重力场的空间分辨率预期可达到约**250km**，**3天**数据解算的时变重力场的空间分辨率可达到约**400km**

3.3 极轨+倾轨的组合模式

潜在应用能力

	GRACE	TQ-2
大气科学	/	0.1mm@1500km/1天
海洋学	/	1mm@200km/月
水文学	10%	40%
地震学	Mw>8.0	Mw>7.0
冰川学	>300km	>200km

◆ 提升时变重力场在大气、水文、地震、冰川和海洋等领域的应用能力！

1 研究背景

2 重力卫星数据处理进展

2.1 L0数据处理技术

2.2 L1a数据精细处理

2.3 基于L1b数据的精细建模

3 TQ-2反演地球重力场

3.1 一组极轨模式

3.2 一组倾轨模式

3.3 极轨+倾轨的组合模式

4 结论与展望

4 结论与展望

- ◆ HUST具备了重力卫星“L0-L1a-L1b-L2”的全链条数据处理能力。
- ◆ 研制的HUST-Grace2020模型精度优于官方机构最新发布RL06产品，研制的HUST-ERA5产品精度优于官方机构GFZ最新发布的AOD RL06产品，正在服务于我国自主重力卫星XX4数据处理平台建设。
- ◆ 采用一组极轨模式，由于大气海洋混频误差的影响，TQ-2监测时变重力信号的能力提升有限。
- ◆ 采用一组倾斜轨道模式，在有效观测范围内TQ-2监测时变重力信号的能力显著优于GRACE和GRACE Follow-On卫星。
- ◆ 采用两组卫星（极轨+倾轨）的组合模式，TQ-2反演地球重力场信号的能力相比于GRACE可提升10~20倍，且能够显著提升地球重力场的时空分辨率及在水文、地震、大气、冰川和海洋等领域的应用能力。



欢迎到华中科技大学交流指导！