



## 利用三维加速度点质量模型法解算华北地区陆地水储量变化

魏伟, 苏勇, 郑文磊, 谷延超, 张洛恺

引用本文:

魏伟, 苏勇, 郑文磊, 谷延超, 张洛恺. 利用三维加速度点质量模型法解算华北地区陆地水储量变化[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2022, 47(4): 551–560.

WEI Wei,SU Yong,ZHENG Wenlei,GU Yanchao,ZHANG Luokai. Monitoring the Variation of Terrestrial Water Storage in North China by Three-Dimensional Acceleration Point-Mass Modeling Approach[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 551–560.

---

### 相似文章推荐（请使用火狐或IE浏览器查看文章）

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### [利用Swarm星群探测亚马逊流域2015–2016年干旱事件](#)

2015–2016 Drought Event in the Amazon River Basin as Measured by Swarm Constellation

武汉大学学报 · 信息科学版. 2020, 45(4): 595–603 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180273>

#### [利用形状模型进行火卫一高阶重力场建模](#)

High Degree Phobos Gravity Field Modeling Based on Shape Model

武汉大学学报 · 信息科学版. 2020, 45(4): 604–611 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190104>

#### [附加高水平分辨率PWV约束的GNSS水汽层析算法](#)

GNSS Water Vapor Tomography Algorithm Constrained with High Horizontal Resolution PWV Data

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1627–1635 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210055>

#### [联合全极化SAR和IRI估计三维电子密度分布](#)

Estimation of Three-Dimensional Electron Density Distribution Using Polarimetric SAR and IRI Observations

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1677–1685 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210061>

#### [融合InSAR和GNSS的三维形变监测:利用方差分量估计的改进SISTEM方法](#)

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(10): 1598–1608 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210113>

DOI:10.13203/j.whugis20190423



文章编号:1671-8860(2022)04-0551-10

# 利用三维加速度点质量模型法解算华北地区陆地水储量变化

魏伟<sup>1</sup> 苏勇<sup>1</sup> 郑文磊<sup>1</sup> 谷延超<sup>1</sup> 张洛恺<sup>2</sup>

1 西南石油大学土木工程与测绘学院,四川 成都,610500

2 61287部队,四川 成都,610036

**摘要:**三维加速度点质量模型法为反演陆地水储量变化提供了新的途径,采用三维加速度点质量模型法计算了中国华北地区2003—2014年的水储量变化。为了检验反演结果,采用球谐系数法以及德克萨斯大学空间研究中心(Center for Space Research, University of Texas at Austin, CSR)发布的RL06 Mascon模型进行对比分析。研究结果表明,两种方法反演结果均反映出华北地区陆地水储量长期处于亏损趋势,但不同方法计算的亏损速度有一定的差别,三维加速度点质量模型法采用CSR提供的RL06数据反演的华北地区陆地水储量亏损速度为 $-3.09 \text{ cm/a}$ ,而球谐系数法反演结果为 $-2.60 \text{ cm/a}$ ;三维加速度点质量模型法特征点的反演结果与Mascon法相关系数更高,而球谐系数法与三维加速度点质量模型法结果之间的差异主要是由条带噪声约束平滑策略不一致导致的。

**关键词:**卫星重力测量;三维加速度点质量模型法;水储量变化;华北地区

中图分类号:P228

文献标志码:A

由美德联合实施的重力恢复与气候实验重力卫星(gravity recovery and climate experiment, GRACE)计划极大促进了全球质量变化的研究,为研究全球水质量变化、海洋环流、地球内部质量变化提供了新的途径。地球重力场的变化主要是由地表及地球内部质量分布变化引起的,通过监测重力场变化,并扣除其他因素的影响,可以反演出水储量(terrestrial water storage, TWS)的变化。华北地区作为中国重要的经济、政治、工业中心,面临严重的水资源过度开采问题,通过GRACE重力卫星监测华北平原水储量变化具有重要的意义。

目前球谐系数法、Mascon法以及点质量模型法是反演地球质量变化的主要方法<sup>[1]</sup>,被广泛应用于重力卫星监测地球质量变化。文献[2]详细推导了利用重力场球谐位系数变化反演地球质量变化的过程<sup>[2]</sup>,利用GRACE重力卫星数据在一定时间及空间分辨率上可以反演出精度达2 mm的陆地水储量变化,以及精度达0.1 mbar的海底压强变化。此后,由于GRACE卫星设计等

原因,使用原始数据直接进行反演会存在明显的南北条带噪声,于是许多学者在此基础上进一步,提出了许多滤波方法,并对亚马逊流域、中国华北地区、印度北部、格陵兰岛等水储量变化剧烈区域进行了监测<sup>[3-7]</sup>。文献[8]则最早使用Mascon参数对水储量变化进行描述;文献[9]在该方法的基础上使用时间-空间约束方法对反演结果进行约束,有效提高反演结果的时空分辨率。点质量模型法直接建立地球表面质量变化与重力卫星所受摄动加速度的关系,根据联系参数的不同,将点质量模型法分为扰动位点质量模型法、径向点质量模型法以及三维加速度点质量模型法3种。文献[10]使用扰动位点质量模型法对亚马逊河和奥里诺科河流域的质量变化进行了反演,其反演结果在空间分辨率上比球谐系数法更优;文献[11-12]采用径向点质量模型法对格陵兰岛的质量变化进行了研究,验证了该方法的有效性;文献[13]采用径向点质量模型法对中国大陆及周边地区水储量进行反演,所得结果优于球谐系数法反演结果;文献[14]采用附有空

收稿日期:2020-05-14

项目资助:国家自然科学基金(41804077);西南石油大学测绘遥感青年科技创新团队(2017CXTD09)。

第一作者:魏伟,硕士生,主要从事卫星重力监测全球质量变化等研究。wei0182@foxmail.com

通讯作者:苏勇,博士,副教授。suyongme@foxmail.com

间约束的三维加速度点质量模型法解算了全球质量变化,且对比分析了各类约束方法的有效性。华北地区包括山西省、河北省、北京市、天津市以及华北平原地带,总计面积约372 100 km<sup>2</sup>,如图1所示。

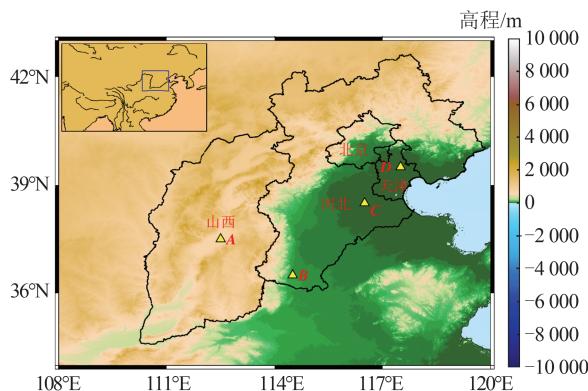


图1 华北地区示意图

Fig.1 Map of North China

近几十年来,华北地区水资源的缺乏已经严重影响该地区工农业的进一步发展,30%~50%的农业灌溉用水无效渗透及蒸发,同时水资源的开采力度随着经济社会的发展不断加大,导致该地区地下水严重匮乏。虽然降雨对该地区地表及地下水进行了一定的补给,但降雨量的减少以及地下水资源的过度开采,使该地区的地下水位持续下降,研究表明,华北地区降雨近几十年都处在下降的趋势<sup>[15]</sup>。处于黄河以北,燕山以南,太行以东的华北平原更是重度资源型缺水地区,该地区作为中国最大的小麦与玉米种植区域,有85%的水用于农业生产,而农业用水大部分来自地下水的开采,只有少部分地表水用于农业灌溉。同时,华北平原作为城市与工业密集区,对水资源有巨大的需求,2001—2017年,北京、天津两地工业用水量从13.67亿t下降到8.99亿t,河北省由27.13亿t下降至20.3亿t<sup>[16]</sup>,虽然减缓了水资源的过度利用,但由于几十年地下水的不断开采,1960年在天津开始形成沉降中心,导致海水倒灌、房屋沉降、土地盐渍化等一系列问题<sup>[17]</sup>。为研究该地区水储量变化情况,本文基于德国地学研究中心(Deutsches GeoForschungsZentrum, GFZ)、喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、德克萨斯大学空间研究中心(Center for Space Research, University of Texas

at Austin, CSR)三大机构提供的2003—2014年(共133个月)GRACE重力卫星数据,采用三维加速度点质量模型法,解算了华北地区陆地水储量的变化,并采用球谐系数法、GLDAS(global land data assimilation)水文模型以及CSR发布的RL06 Mascon模型进行对比分析。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据处理及检验方法

本文选取GFZ、JPL、CSR所发布的2003—2014年的Level-2 Release 06时变重力场模型数据作为实验数据,截断至60阶,该数据已除去潮汐和非潮汐等因素影响。首先计算该数据的平均球谐位系数值作为静态重力场,再计算每月相对于该静态重力场的差值,反演出该月相对于静态重力场的水储量变化。GRACE卫星空间分辨率为200~300 km,三维加速度点质量模型法将地面研究区域划分为1°×1°的等角格网,与GLDAS水文模型格网间隔保持一致,而空间格网划分为0.5°×0.5°的等角格网,提供多余观测量。由于GRACE卫星对地球重力场球谐位系数C<sub>20</sub>项不敏感<sup>[18]</sup>,因此本文实验均采用基于卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)数据解算的C<sub>20</sub>数据进行替换。球谐系数法采取200 km高斯滤波进行滤波处理<sup>[19]</sup>。除此之外,采用美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的GLDAS水文模型数据进行验证,为减小每个水文模式的不确定性,选用该模型的Noah、Mosaic、VIC(the variable infiltration capacity)、CLM(the community land model)4种模式的均值作为最终估计值,同时由于雨雪变化对华北地区长期水储量变化影响较小<sup>[20]</sup>,本文只选取水文模型的土壤水分进行计算。为更好地评估对比反演结果,采用CSR发布的GRACE RL06 Mascon模型,与RL05 Mascon模型相比,该模型定义了新的网格,最大程度地减少了海洋与陆地信号之间的泄漏,而该模型对于病态问题的处理采用Tikhonov正则化方法,同时结合L曲线确定Mascon解的正则化参数。

### 1.2 三维加速度点质量模型法基本原理

重力卫星在运动中受到地面质量变化影响而产生相应的摄动加速度,可以表示为<sup>[21]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \delta\ddot{r}^x \\ \delta\ddot{r}^y \\ \delta\ddot{r}^z \end{bmatrix} = \frac{GM}{2r^2} \sum_{n=0}^N \left( \frac{R}{r} \right)^n \sqrt{\frac{2n+1}{2n+3}} \sum_{m=0}^n \left\{ \delta \bar{C}_{nm} \begin{bmatrix} C_{nm}^- - C_{nm}^+ \\ -S_{nm}^- - S_{nm}^+ \\ -2C_{nm}^0 \end{bmatrix} + \delta \bar{S}_{nm} \begin{bmatrix} S_{nm}^- - S_{nm}^+ \\ C_{nm}^- + C_{nm}^+ \\ -2S_{nm}^0 \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

式中,  $G$  表示万有引力常量;  $M$  表示地球质量常量;  $R$  表示地球半径;  $\delta\bar{C}_{nm}$  和  $\delta\bar{S}_{nm}$  表示与地球质量变化相对应的地球球谐系数的变化量;  $r$  表示重力卫星到地心的向径;  $n$  和  $m$  则分别表示地球球谐位系数的阶和次;  $C_{nm}^-$ 、 $C_{nm}^+$ 、 $C_{nm}^0$  和  $S_{nm}^-$ 、 $S_{nm}^+$ 、 $S_{nm}^0$  可参见文献[21-22]。

由于地球并非刚体,会产生形变,该形变也会引起地球球谐位系数的变化,因此地球球谐位

$$\begin{bmatrix} \delta\ddot{r}^x \\ \delta\ddot{r}^y \\ \delta\ddot{r}^z \end{bmatrix} = \frac{GM}{2r^2} \sum_{n=0}^N \left( \frac{R}{r} \right)^n \frac{1}{1+k_n} \sqrt{\frac{2n+1}{2n+3}} \sum_{m=0}^n \begin{cases} \Delta\bar{C}_{nm} \begin{bmatrix} C_{nm}^- - C_{nm}^+ \\ -S_{nm}^- - S_{nm}^+ \\ -2C_{nm}^0 \end{bmatrix} + \Delta\bar{S}_{nm} \begin{bmatrix} S_{nm}^- - S_{nm}^+ \\ C_{nm}^- + C_{nm}^+ \\ -2S_{nm}^0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

此外,在三维直角坐标系中,假设有地面点  $M_j(x_j, y_j, z_j)$ , 空间中一点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ , 两点之间的引力与  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴的夹角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 将两点之间的万有引力分解至三轴, 得到地面上所有点对空间中任意一点的摄动加速度为:

$$\begin{cases} \delta\ddot{r}^x = -G \sum_{j=1}^p \frac{x_i - x_j}{l_{ij}^3} \delta m_j \\ \delta\ddot{r}^y = -G \sum_{j=1}^p \frac{y_i - y_j}{l_{ij}^3} \delta m_j \\ \delta\ddot{r}^z = -G \sum_{j=1}^p \frac{z_i - z_j}{l_{ij}^3} \delta m_j \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $i=1, 2 \dots n, n$  为空间观测卫星点个数;  $p$  为地面点的总个数;  $\delta m_j$  为地面点的质量变化;  $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$  表示两点之间的几何距离。

联合式(3)和式(4),建立观测方程为:

$$v = Ax - l \quad (5)$$

式中,  $v$  为误差向量;  $A$  为设计矩阵;  $l$  为观测向量;  $x$  为未知参数向量。通过最小二乘,可求得未知参数的最优线性无偏估计为:

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (6)$$

重力场反演质量变化是一个向下延拓的过程,式(6)呈病态无法直接求解最优估值,文献[14]引入等权、线性、指数以及高斯形式的4种空间约束方法对病态问题和南北条带噪声问题进行处理,并与常用的零阶 Tikhonov 正则化反演结果进行比较。结果表明,4种形式的空间约束精度都优于零阶 Tikhonov 正则化方法,本文选取4种空间约束方法中约束效果最好的线性形式进行计算,最优相关距离设为 600 km,未知参数的正则化解为:

$$\hat{x} = (A^T P A + \alpha N^T N)^{-1} A^T P A l \quad (7)$$

系数的总变化为地表质量变化引起的改变与负荷形变引起的改变之和,计算如下<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta\bar{C}_{nm} = \delta\bar{C}_{nm} + k_n \delta\bar{C}_{nm} \\ \Delta\bar{S}_{nm} = \delta\bar{S}_{nm} + k_n \delta\bar{S}_{nm} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\Delta\bar{C}_{nm}$ 、 $\Delta\bar{S}_{nm}$  是地球球谐系数的变化量;  $k_n$  表示  $n$  阶负荷勒夫数;  $k_n \delta\bar{S}_{nm}$ 、 $k_n \delta\bar{C}_{nm}$  表示由于地球非刚体而产生的负荷形变。将式(2)代入式(1),得到由地表质量变化引起的重力卫星摄动加速度:

$$\begin{cases} \Delta\bar{C}_{nm} \begin{bmatrix} C_{nm}^- - C_{nm}^+ \\ -S_{nm}^- - S_{nm}^+ \\ -2C_{nm}^0 \end{bmatrix} + \Delta\bar{S}_{nm} \begin{bmatrix} S_{nm}^- - S_{nm}^+ \\ C_{nm}^- + C_{nm}^+ \\ -2S_{nm}^0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为正则化参数;  $N$  为正则化矩阵。正则化参数的选取关系到正则化解的确定,过大的参数会造成矩阵内的数据过度平滑,无法表示真实的质量变化情况;参数过小,正则化效果不明显,无法对系数矩阵求逆。

对于正则化参数的选取,本文选用 L 曲线法进行确定<sup>[22]</sup>, 将  $\lg(\|Ax - l\|)$  作为横轴,  $\lg(\|x\|)$  作为纵轴, 其中  $\|\cdot\|$  表示 2 范数, 所得 L 型图形上曲率最大的点, 即为正则化参数所对应的点。L 曲线法旨在寻找满足正则化解和残差项都较小的一个点, 使用该方法确定的正则化解为近似最优解。

为了更直观地对比三维加速度点质量模型法解算结果与球谐系数法反演结果, 将三维加速度点质量模型法的反演结果转化为等效水高, 计算如下:

$$\begin{cases} S_j = (R\Delta\varphi) \times (R\Delta\lambda) \cos\varphi_j \\ \delta m_j = \rho_w \times \Delta h_j \times S_j \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $S_j$  为研究区域面积;  $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\lambda$  分别为研究区域的纬度间隔和经度间隔;  $\rho_w$  为水的密度;  $\Delta h_j$  为研究区域的等效水高;  $\varphi_j$  为研究区域中心的纬度。

## 2 结果与分析

### 2.1 正则化参数的选取

本文通过 L 曲线法确定最优正则化参数, 图 2 给出了 CSR、JPL 以及 GFZ 数据的 L 曲线示意图。选取 2010-01 数据, 根据 L 曲线的性质, 得到曲率最大点所对应的正则化参数, CSR、JPL、GFZ 的正则化参数均为  $3 \times 10^{-41}$ 。为了对比不同正则化参数的效果, 分别取大于和小于  $3 \times 10^{-41}$  的正则化参数值绘制了如图 3 所示的水储量变化空域图。

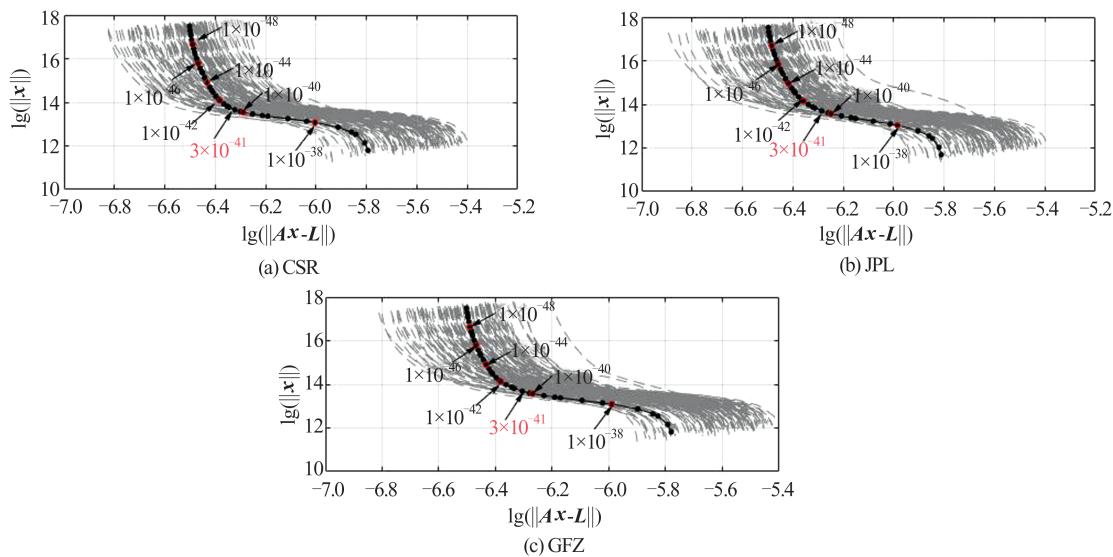


图 2 L 曲线示意图  
Fig.2 Illustration of L-curve

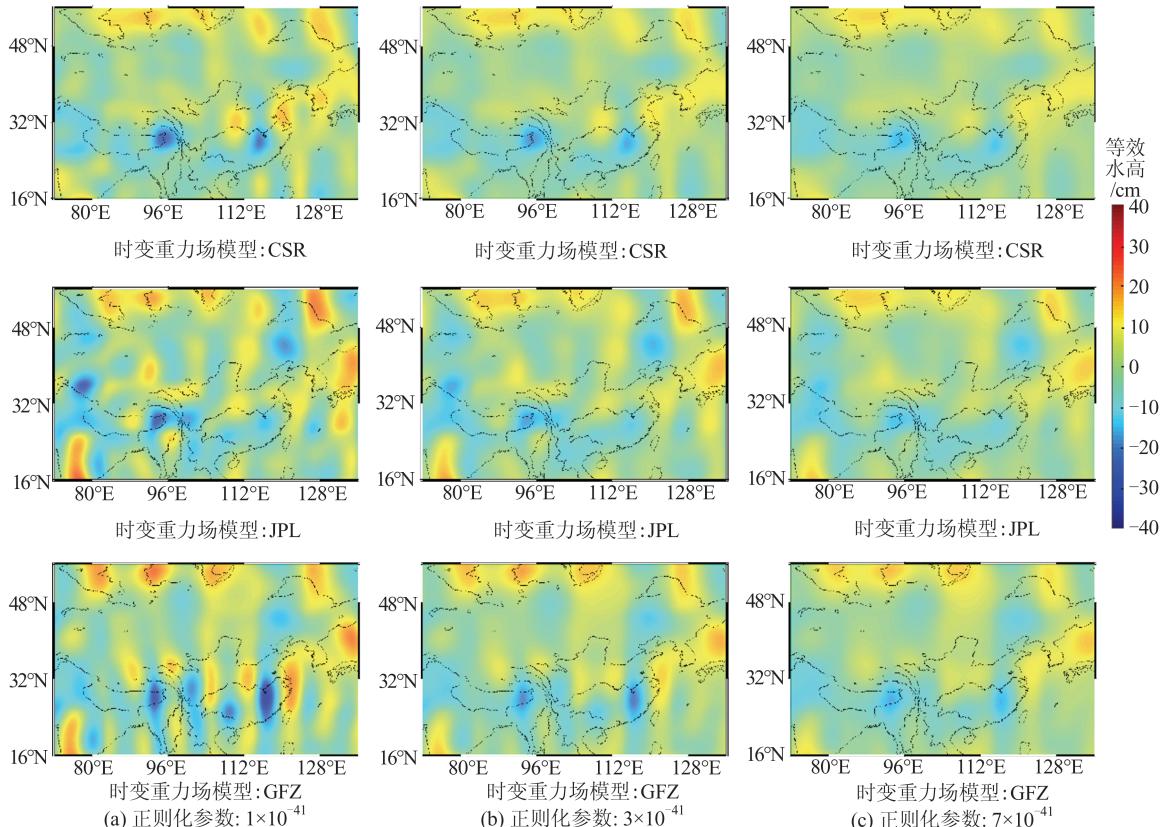


图 3 2010-01 水储量变化空域图  
Fig.3 Spatial Map of TWS Change in January 2010

由图3(a)可知,正则化参数选取过小时,不能对南北噪声产生较好的滤波平滑效果;由图3(c)可知,正则化参数过大时,虽然对南北条带噪声有较好的抑制,但对地面点水储量变化信号也产生平滑效果,导致信号不明显;由图3(b)可知,L曲线所得正则化参数可在有效保留水储量变化的同时,抑制南北条带噪声。

由于各大机构所发布的重力场模型具有一定的差异，所以相同时段的反演结果具有差异性。相比另外两大机构的数据反演结果，利用CSR发布数据反演的水储量变化具有较小的南北条带噪声。

## 2.2 东亚地区水储量变化趋势

根据 CSR 提供的 GRACE 重力场模型数据，

分别采用三维加速度点质量模型法与球谐系数法反演东亚地区 2003—2014 年的水储量变化趋

势,并与 CSR 所发布的 GRACE RL06 Mascon 模型进行比较,如图 4 所示。

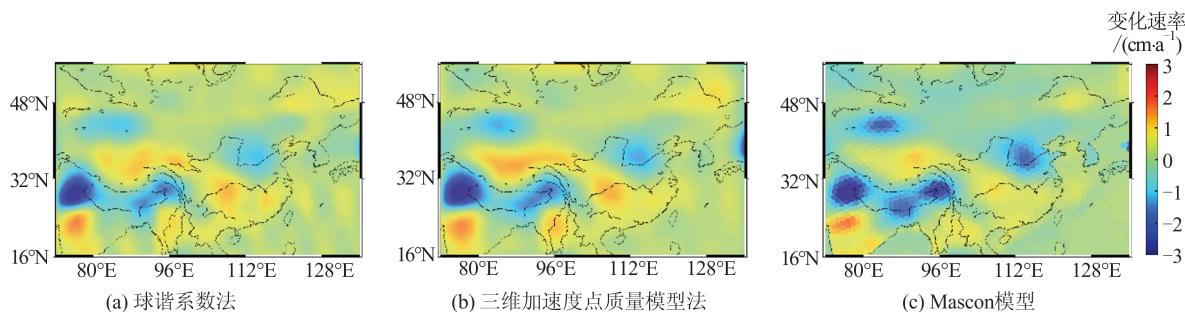


图 4 2003—2014 年东亚地区水储量变化速率

Fig.4 Trend of TWS in East Asia in 2003–2014

由图 4 可知,3 种方法反演结果存在明显的空间相似性,且在数值上也较为吻合,由于 RL06 Mascon 采用 0.25° 格网进行发布,在网格中可以正确定义海岸线的分布,因此较好地减少了陆地和海洋信号之间的泄漏问题,而本文对陆地和海洋之间信号泄漏问题没有进行处理,所以在陆地和海洋交界处信号分布有一定的差异。缅甸北部、印度北部以及中国华北地区、吐鲁番盆地、准噶尔盆地都存在明显的水储量亏损趋势,印度水储量亏损速度异常明显,范围及数值显著高于华北地区和缅甸北部,主要是由农业灌溉而过度开发水资源造成<sup>[23]</sup>。新疆地区水储量亏损主要位于吐鲁番、准噶尔两个盆地地区,该地区降雨量少,气候干燥,蒸发量强,地下水补给不足,无节制的开采导致水储量处于亏损趋势。三维加速度点质量模型法所反演的华北地区水储量在 2003—2014 年间呈亏损趋势,并且周边地区同样呈现亏损信号,如河南、山东等地。三维加速度点质量模型法反演结果信号高于球谐系数法反演结果,主要由于两者所采用的平滑策略不同,但 200 km 高斯滤波和线性形式的空间约束方法都有效抑制了 GRACE 卫星缺陷和数据误差所带来的南北条带噪声,保留了有效信号。

### 2.3 特征点水储量变化

选取图 1 中质量变化明显的特征点 A、B、C、D 进行研究,分别采用球谐系数法和三维加速度点质量模型法对 2003—2014 年陆地水储量变化进行反演,结果分别如图 5、6、7、8 所示。

对比图 5~8 可知,球谐系数法与三维加速度点质量模型法所反演的水储量变化较为一致,但由于平滑策略的区别,三维加速度点质量模型法反演结果的振幅略大于球谐系数法,而由于平均重力场的选取不一致,Mascon 模型反演结果与其

他两者的振幅有一定区别;虽然特征点水储量变化存在年际特征,且曲线趋势较为平坦,但通过拟合发现,3 种方法所反演的 4 个特征点在 2003—2014 年的水储量都呈现亏损趋势。

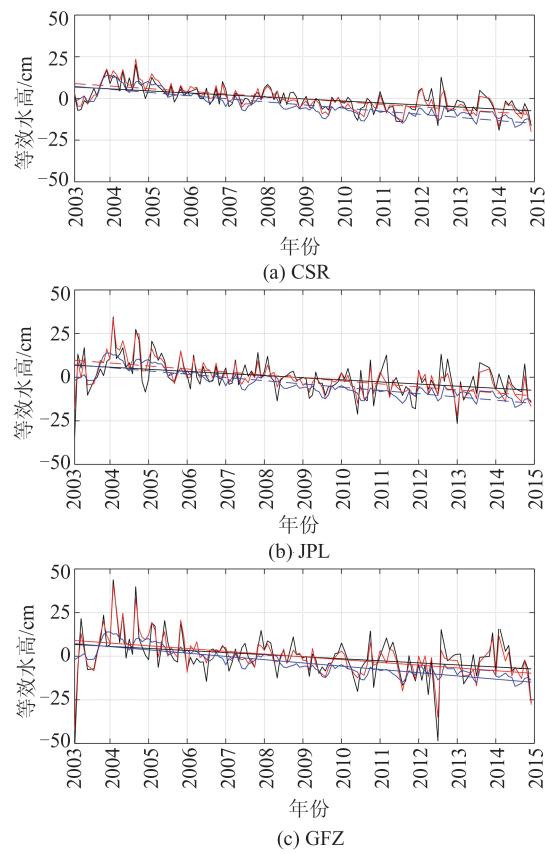


图 5 特征点 A 水储量变化趋势

Fig.5 TWS Trend of Characteristic Point A

球谐系数法与三维加速度点质量模型法反演结果的相关系数如表 1 所示。由表 1 可知,这两种方法反演的 4 个特征点的结果呈现出高度相关。进一步统计这两种方法反演结果与 Mascon 模型的相关系数,结果如表 2 所示。由表 2 可知,

与球谐系数法相比,三维加速度点质量模型法反演结果与Mascon模型法结果有更高的相关系数。

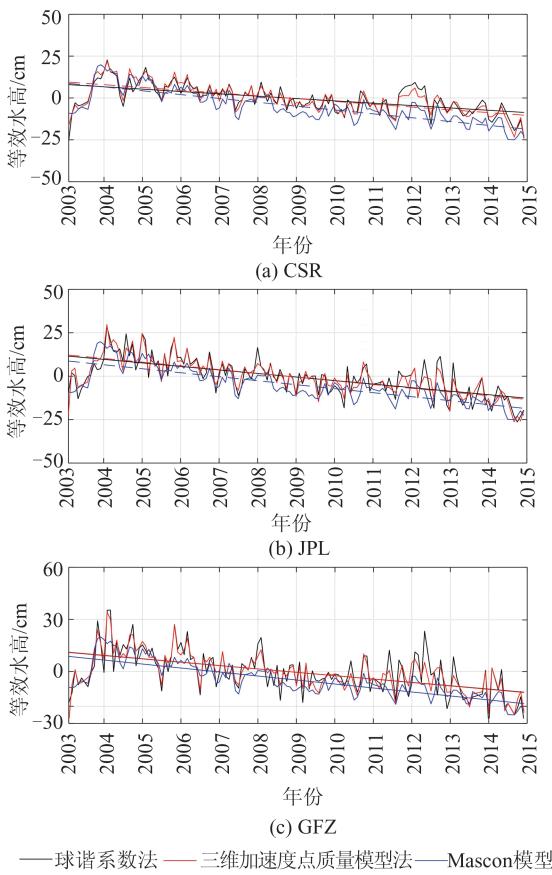


图6 特征点B水储量变化趋势

Fig.6 TWS Trend of Characteristic Point B

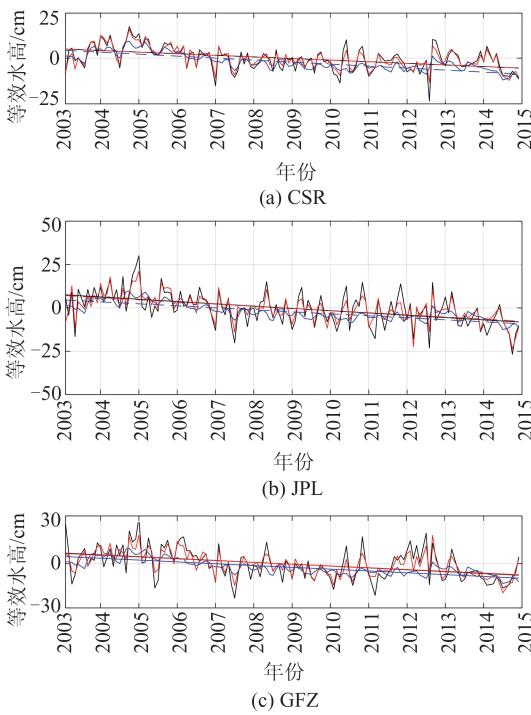
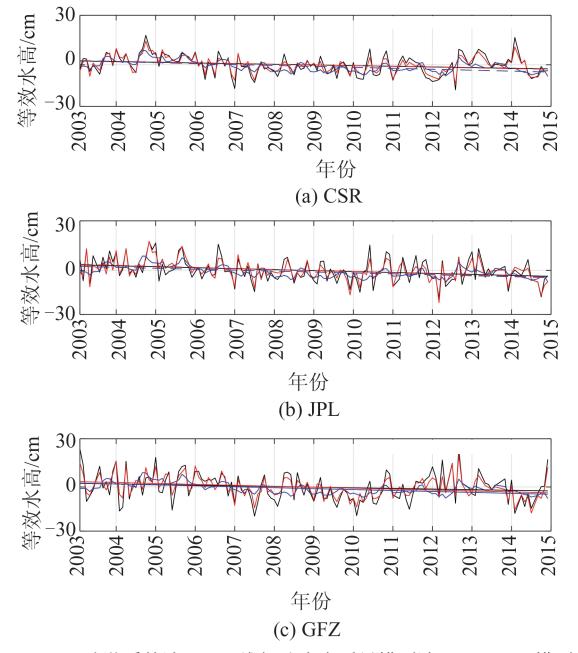


图7 特征点C水储量变化趋势

Fig.7 TWS Trend of Characteristic Point C



—球谐系数法 —三维加速度点质量模型法 —Mascon模型

图8 特征点D水储量变化趋势

Fig.8 TWS Trend of Characteristic Point D

表1 球谐系数法与三维加速度点质量模型法

特征点反演结果相关系数

Tab.1 Correlation Coefficient of Results of Characteristic Points by Spherical Harmonic Approach and Three-Dimensional Acceleration Point-Mass Modeling Approach

特征点	GFZ数据	JPL数据	CSR数据
A	0.90	0.87	0.93
B	0.91	0.93	0.94
C	0.89	0.90	0.94
D	0.90	0.90	0.95

表2 球谐系数法、三维加速度点质量模型法特征点反演结果与Mascon法结果的相关系数

Tab.2 Correlation Coefficient of Results of Characteristic Points by Spherical Harmonic Approach, Three-Dimensional Acceleration Point-Mass Modeling Approach and Mascon Model

特征点	三维加速度点质量模型法			球谐系数法		
	GFZ	JPL	CSR	GFZ	JPL	CSR
A	0.70	0.80	0.89	0.49	0.55	0.74
B	0.85	0.86	0.91	0.73	0.78	0.81
C	0.68	0.67	0.80	0.51	0.54	0.70
D	0.48	0.56	0.67	0.33	0.45	0.60

## 2.4 华北地区水储量变化趋势

图9为采用三维加速度点质量模型法与球谐系数法反演得出的华北地区的水储量变化趋势空间分布图,展示了河南省及山东省部分地区水

储量变化趋势。由图 9 可知,这两种方法的反演结果在空间分布上相似,华北地区水储量基本都

处于下降趋势,且在河北、山西、河南、山东省的交界处,水储量有较大的亏损。

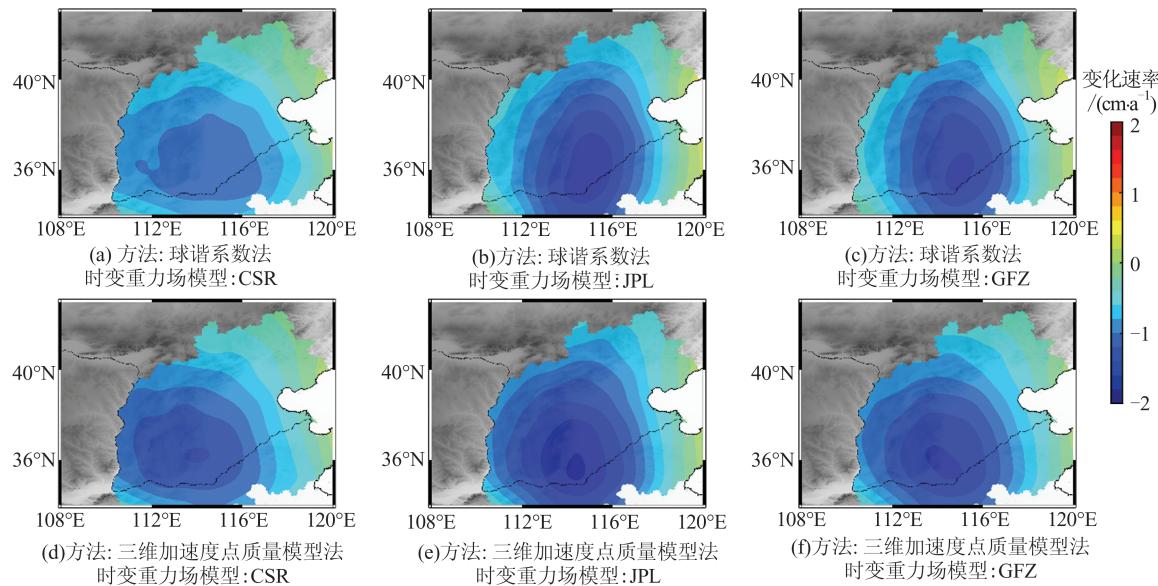


图 9 2003—2014 年华北地区水储量变化速率

Fig.9 Trend of TWS in North China from 2003 to 2014

利用 Mascon、GLDAS 水文模型所计算的 2003—2014 年华北地区水储量变化趋势如图 10 所示。由图 10 可以看出,GLDAS 水文模型结果在数值和空间分布上与其他反演结果有较大差异,GLDAS 所反演的水储量变化速率为  $-0.21 \text{ cm/a}$ ,远小于其他反演结果,主要原因可能在于 GLDAS 水文模型数据主要反映的是

土壤湿度以及该地区的冰雪变化<sup>[24]</sup>,华北地区雨雪对水储量影响较小,只采用土壤含水量数据,而通过 GRACE 卫星数据反演的则是整个地区的水储量变化。根据已有研究表明,华北地区地下水亏损严重,所以 GLDAS 水文模型所反演的结果与 GRACE 重力卫星结果有较大的差异。

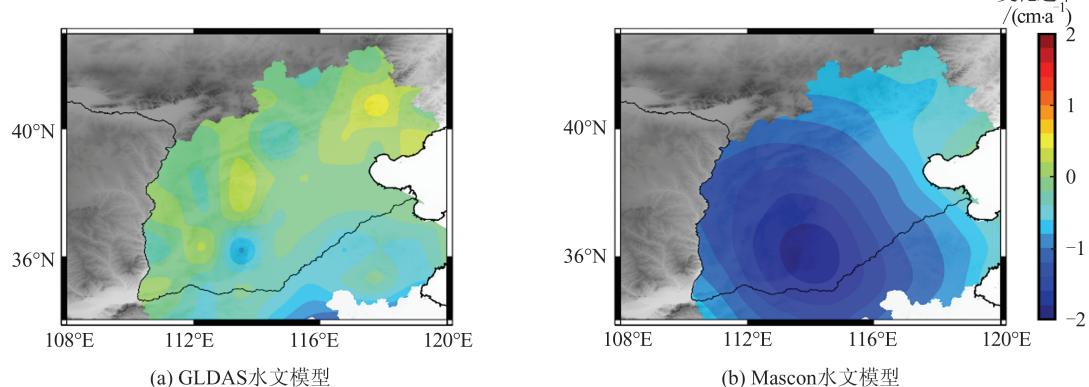


图 10 GLDAS、Mascon 反演的 2003—2014 年华北地区水储量变化速率

Fig.10 Trend of TWS in North China from 2003 to 2014 Using GLDAS and Mascon Model

对比图 9、10 可知,CSR 数据反演结果与 GFZ 和 JPL 数据反演结果有较大区别,可能是重力场模型差异造成的。图 9 中的 GFZ、JPL 反演结果与图 10(b)结果在数值上更为接近,其中图 9(f)与图 10(b)反演结果在数据和空间分布上都较为相似。GRACE 重力卫星数据反演结果表明,在沿海地区陆地水储量呈现增加趋势,这与地区地理

位置有一定的关系。

表 3 统计了基于 GFZ、CSR、JPL 2003—2014 年数据,利用三维加速度点质量模型法和球谐系数法反演得到的华北地区水储量变化趋势。由表 3 可知,两种方法所计算的华北地区水储量都处于亏损趋势,基于不同数据反演的结果有较好的一致性,但三维加速度点质量模型法反演结果

亏损趋势大于球谐系数法反演结果,说明不同的滤波平滑方法对反演结果存在影响。而基于CSR重力场模型数据,三维加速度点质量模型法反演的华北地区陆地水储量的亏损速度为 $-3.09\text{ cm/a}$ ,但文献[19]表明,2003—2010年华北地区地下水储量的亏损速度为 $-2.2\pm0.3\text{ cm/a}$ ,即 $-8.3\pm1.1\text{ km}^3/\text{a}$ 。陆地水储量为地表径流、土壤水和地下水总和<sup>[25]</sup>,同时由于反演策略不同,导致结果存在差异。

**表3 基于GFZ、CSR、JPL2003—2014年数据反演  
水储量变化趋势/(cm·a<sup>-1</sup>)**

Tab.3 Trend of TWS in North China Based on 2003-2014 Data of GFZ, CSR and JPL/(cm·a<sup>-1</sup>)

方法	GFZ	JPL	CSR
三维加速度点质量模型法	-3.41	-3.76	-3.09
球谐系数法	-2.90	-3.15	-2.60

### 3 结语

本文采用三维加速度点质量模型法计算了2003—2014年华北地区陆地水储量变化趋势,并与球谐系数法反演结果、GLDAS水文模型以及Mascon模型相比较。通过反演结果可知:(1)三维加速度点质量模型法计算结果信号变化明显,由于平滑策略的差异,其略大于球谐系数法,但两种方法反演结果都表明华北地区水储量处于亏损趋势,且两者与GLDAS水文模型结果差距较大,说明华北地区可能主要以深层地下水亏损为主,这与已有研究结果相一致。(2)三维加速度点质量模型法能够较好地反演出区域范围内的水储量变化,且与球谐系数法反演结果有很强的相关性,通过结果比较可知,其与Mascon反演结果相关性更高,对于单个特征点,采用不同的重力场模型反演的结果可能不一致。

### 参考文献

- [1] Su Yong, Yu Bin, You Wei, et al. Surface Mass Distribution from Gravity Satellite Observations by Using Three-Dimensional Acceleration Point-Mass Modeling Approach[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(1): 50-60 (苏勇, 于冰, 游为, 等. 基于重力卫星数据监测地表质量变化的三维点质量模型法[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 50-60)
- [2] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*,
- 1998, 103(B12): 30205-30229
- [3] Feng Wei, Jean-Michel Lemoine, Zhong Min, et al. Terrestrial Water Storage Changes in the Amazon Basin Measured by GRACE During 2002-2010 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 814-821 (冯伟, Jean-Michel Lemoine, 钟敏, 等. 利用重力卫星GRACE监测亚马逊流域2002-2010年的陆地水变化[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 814-821)
- [4] Li Wanqiu, Wang Wei, Zhang Chuanyin, et al. Water Storage Variation Inversion in the Tibetan Plateau by Using Forward-Modeling Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 141-149 (李婉秋, 王伟, 章传银, 等. 利用Forward-Modeling方法反演青藏高原水储量变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 141-149)
- [5] Li Zhen, Zhang Chuanyin, Ke Baogui, et al. North Plain Water Storage Variation Analysis Based on GRACE and Seasonal Influence Considering [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 940-949 (李圳, 章传银, 柯宝贵, 等. 顾及GRACE季节影响的华北平原水储量变化反演[J]. 测绘学报, 2018, 47(7): 940-949)
- [6] Gautam P. A Comparative Appraisal of Ground Water Resources Using GRACE-GPS Data in Highly Urbanised Regions of Uttar Pradesh, India[J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2017, 3(4): 441-449
- [7] Yang Yuande, E Dongchen, Chao Dingbo. The Inversion of Ice Mass Change in Greenland Ice Sheet Using GRACE Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(8): 961-964 (杨元德, 鄂栋臣, 晁定波. 利用GRACE数据反演格陵兰冰盖冰雪质量变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(8): 961-964)
- [8] Muller P M, Sjogren W L. Mascons: Lunar Mass Concentrations [J]. *Science*, 1968, 161 (3842): 680-684
- [9] Rowlands D D, Luthcke S B, McCarthy J J, et al. Global Mass Flux Solutions from GRACE: A Comparison of Parameter Estimation Strategies-Mass Concentrations Versus Stokes Coefficients[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2010, 115(B1): B01403
- [10] Han S C, Shum C K, Jekeli C, et al. Improved Estimation of Terrestrial Water Storage Changes from GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(7): L07302
- [11] Baur O, Sneeuw N. Assessing Greenland Ice Mass

- Loss by Means of Point-mass Modeling: A Viable Methodology [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85 (9): 607-615
- [12] Baur O. Greenland Mass Variation from Time-variable Gravity in the Absence of GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40 (16): 4289-4293
- [13] Guo Feixiao, Miao Yuewang, Xiao Yun, et al. Recovery Water Storage Variation in China and Its Adjacent Area by Method of Point-Mass Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(7): 1002-1007 (郭飞霄, 苗岳旺, 肖云, 等. 采用点质量模型方法反演中国大陆及周边地区陆地水储量变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(7): 1002-1007)
- [14] Su Yong, Zheng Wenlei, Yu Biao, et al. Surface Mass Distribution Derived from Three-Dimensional Acceleration Point-Mass Modeling Approach with Spatial Constraint Methods [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(2): 508-519 (苏勇, 郑文磊, 余彪, 等. 反演地表质量变化的附有空间约束的三维加速度点质量模型法[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 508-519)
- [15] Hao Lisheng, Ding Yihui. Progress of Precipitation Research in North China [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5): 593-601 (郝立生, 丁一汇. 华北降水变化研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31 (5): 593-601)
- [16] Jiang Mindong, Liu Xiyu, Xu Jingru, et al. Decoupling Effect Between Economic Growth and Industrial Water Use and Its Driving Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(11): 70-76 (姜明栋, 刘熙宇, 许静茹, 等. 京津冀地区经济增长对工业用水的脱钩效应及其驱动因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(11): 70-76)
- [17] Duan Xiaofeng, Xu Xuegong, Wang Ruobai. Land Subsidence and Its Influencing Factors in Tianjin Coastal Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(6): 1071-1076 (段晓峰, 许学工, 王若柏. 天津沿海地区地面沉降及其影响因素[J]. 北京大学学报·自然科学版, 2014, 50(6): 1071-1076)
- [18] Zhai Ning, Wang Zemin, Wu Yue, et al. Recovery of Yangtze River Basin Water Storage by GRACE Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(4): 436-439 (翟宁, 王泽民, 吴岳, 等. 利用 GRACE 反演长江流域水储量变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(4): 436-439)
- [19] Feng W, Zhong M, Lemoine J M, et al. Evaluation of Groundwater Depletion in North China Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Data and Ground-Based Measurements [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49 (4): 2110-2118
- [20] Feng Wei, Wang Changqing, Mu Dapeng, et al. Groundwater Storage Variations in the North China Plain from GRACE with Spatial Constraints [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(5): 1630-1642 (冯伟, 王长青, 穆大鹏, 等. 基于 GRACE 的空间约束方法监测华北平原地下水储量变化[J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1630-1642)
- [21] Mayer-Gürr T. Gravitationsfeldbestimmung aus der Analyse kurzer Bahnbögen am Beispiel der Satellitenmissionen CHAMP und GRACE [D]. Bonn: University of Bonn, 2006
- [22] Hu Zhigang, Hua Xianghong. Deriving Tikhonov Parameter Using Optimal Regularization Method [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35 (2): 51-53 (胡志刚, 花向红. 利用最优正则化方法确定 Tikhonov 正则化参数[J]. 测绘科学, 2010, 35(2): 51-53)
- [23] Feng Guiping, Song Qingtao, Jiang Xingwei. Global Groundwater Storage Changes and Characteristics Observed by Satellite Gravimetry [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(4): 822-828 (冯贵平, 宋清涛, 蒋兴伟, 等. 卫星重力监测全球地下水储量变化及其特征[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(4): 822-828)
- [24] Zhan Jingang, Wang Yong. Detect Water Storage Variation of Longtan Reservoir with GRACE Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(5): 1187-1192 (詹金刚, 王勇. 卫星重力捕捉龙滩水库储水量变化[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1187-1192)
- [25] Li Wanqiu, Wang Wei, Zhang Chuanyin, et al. Monitoring Groundwater Storage Variations in the Guanzhong Area Using GRACE Satellite Gravity Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61 (6): 2237-2245 (李婉秋, 王伟, 章传银, 等. 利用 GRACE 卫星重力数据监测关中地区地下水储量变化[J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2237-2245)

## Monitoring the Variation of Terrestrial Water Storage in North China by Three-Dimensional Acceleration Point-Mass Modeling Approach

WEI Wei<sup>1</sup> SU Yong<sup>1</sup> ZHENG Wenlei<sup>1</sup> GU Yanchao<sup>1</sup> ZHANG Luokai<sup>2</sup>

1 School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 Troops 61287, Chengdu 610036, China

**Abstract:** Objectives: The lack of water resources in North China has severely affected the further development of industry and agriculture in the region. Previous studies have shown that terrestrial water storage (TWS) in North China are in a long-term loss trend, but the inversion methods are different, and three-dimensional acceleration point-mass modeling approach (3D-PMA) provides a new way for inversion of changes in TWS. Methods: We invert TWS in North China from 2003 to 2014 based on 3D-PMA. 3D-PMA decomposes the changes of the satellite's perturbation force into the three directions of the coordinate axis, and establishes the least square equation through theoretical calculations and observations. We use the average spherical harmonic coefficients from 2003 to 2014 as the background model, and replace  $C_{20}$  with satellite laser ranging (SLR) data. The monthly difference relative to the background model is used as the change in the spherical harmonic coefficient caused by the change in surface mass. For the ill-posed problems of least squares, the 600 km linear-type spatial constraint is adopted. In order to verify the results, spherical harmonic approach (SH) and the RL06 Mascon model released by Center for Space Research, University of Texas at Austin (CSR) are used for comparative analysis. Results and Conclusions: The inversion results of the 3D-PMA and SH approaches indicate that TWS in North China have been in a long-term loss trend, but the loss rates calculated by different methods have certain differences. The loss rate of 3D-PMA is  $-3.09 \text{ cm/a}$ , and SH is  $-2.60 \text{ cm/a}$  while using RL06 data provided by CSR to inverse TWS in North China. According to the calculation results of the characteristic points, 3D-PMA and Mascon have a higher correlation, and the difference between SH and 3D-PMA is mainly due to the inconsistency of the striping noise constraint smoothing strategy.

**Key words:** satellite gravity measurements; three-dimensional acceleration point-mass modeling approach; terrestrial water storage; North China

**First author:** WEI Wei, postgraduate, specializes in satellite gravity monitoring mass change. E-mail: wei0182@foxmail.com

**Corresponding author:** SU Yong, PhD, associate professor. E-mail: suyongme@foxmail.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41804077); the Scientific and Technological Innovation Team of SWPU (2017CXTD09).

**引文格式:** WEI Wei, SU Yong, ZHENG Wenlei, et al. Monitoring the Variation of Terrestrial Water Storage in North China by Three-Dimensional Acceleration Point-Mass Modeling Approach[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4):551-560. DOI:10.13203/j.whugis20190423(魏伟,苏勇,郑文磊,等.利用三维加速度点质量模型法解算华北地区陆地水储量变化[J].武汉大学学报·信息科学版,2022,47(4):551-560.DOI:10.13203/j.whugis20190423)