

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.03.013

利用 GRACE 卫星分析安徽省地下水储量的时空变化

谢广阔, 陶庭叶, 马敏, 胡尚

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章利用重力恢复与气候实验卫星(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)时变重力场球谐系数文件,联合全球陆面数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)水文模型反演安徽省 2003—2016 年地下水储量的时空变化。通过奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)地下水时间序列,结合热带降雨测量任务(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)降雨数据对地下水储量变化规律进行分析。结果表明,安徽省地下水储量在 2011 年和 2014 年前后发生较大变化,在 2003—2011 年的变化率为 0.37 cm/a, 2011—2014 年的下降速率为-0.2 cm/a, 2014—2016 年的增长速率为 1.9 cm/a;进一步与降雨数据关联,发现降雨量是影响安徽省地下水储量年际变化和季节性变化的主要因素。在空间上,安徽省呈现自东北向西南逐渐缓和的趋势,最大亏损出现在皖北地区,为-7.52 mm/a,在西南地区的最大盈余达到 8.38 mm/a。

关键词:安徽省;重力恢复与气候实验卫星(GRACE);全球陆面数据同化系统(GLDAS);地下水储量;奇异谱分析(SSA)

中图分类号:P228

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)03-0367-07

Analysis of spatial and temporal variation of groundwater storage in Anhui Province using GRACE satellite

XIE Guangkuo, TAO Tingye, MA Min, HU Shang

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In this paper, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) time-varying gravity field spherical harmonic coefficient files, combined with Global Land Data Assimilation System (GLDAS) hydrological model are used to invert the spatial and temporal variation of groundwater storage in Anhui Province from 2003 to 2016. Groundwater time series are analyzed by singular spectrum analysis (SSA) and then combined with Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) precipitation data, the variation patterns of the groundwater storage are analyzed. The results show that the groundwater storage in Anhui Province changed significantly in 2011 and 2014, with a rate of change of 0.37 cm/a from 2003 to 2011, a rate of decrease of -0.2 cm/a from 2011 to 2014, and a rate of increase of 1.9 cm/a from 2014 to 2016. Further study reveals that precipitation is the main factor affecting interannual and seasonal variation of groundwater storage in Anhui Province. Spatially, Anhui Province shows a gradual moderating trend from northeast to southwest, with the maximum deficit appearing in northern Anhui at -7.52 mm/a and the maximum surplus in southwest Anhui reaching 8.38 mm/a.

Key words: Anhui Province; Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE); Global Land Data Assimilation System (GLDAS); groundwater storage; singular spectrum analysis (SSA)

收稿日期:2022-06-01;修回日期:2022-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42004001);煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室开放基金资助项目(E22015)

作者简介:谢广阔(1998—),男,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

陶庭叶(1980—),男,安徽芜湖人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:taotingye@hfut.edu.cn.

0 引言

地下水是全球维持农业、工业生产和人类生活领域的宝贵资源,过度开采地下水会导致缺水 and 严重干旱。研究地下水储量的变化不仅能探测出过去的损耗,更能对未来起到预测警示作用。

重力恢复与气候实验卫星(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)是由美国国家航天局和德国宇航中心联合开发的,于 2002 年 3 月成功发射^[1]。相较于传统的水位监测方法,GRACE 重力卫星为全球、区域以及流域的陆地水资源监测开辟了新途径^[2]。近年来,海内外学者围绕着 GRACE 重力卫星数据和水文模型监测不同地区的地下水储量异常变化开展了大量研究。这些研究主要集中在全球水资源消耗严重的区域,比如美国的加州地区^[3]、印度北部^[4]、亚马逊流域^[5]、华北平原^[6]、长江流域^[7]等。这些研究结果表明,利用 GRACE 和水文模型反演的地下水与地面监测井实测的地下水储量变化有着良好的相关性,也反映了 GRACE 监测大范围地下水储量变化的可靠性和未来发展的无穷潜力。

持续消耗的地下水在将来会构成巨大的威胁。本文利用 2003 年 1 月至 2016 年 12 月共 151 个月的 GRACE 球谐数据,扣除全球陆面数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)水文模型中地表水的水文分量来反演安徽省地下水储量变化并进行时空分析,通过奇异谱分析(singular spectrum analysis, SSA)提取时间序列中的重构成分,结合热带降雨测量任务(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)降雨数据对地下水储量变化规律进行分析。

1 研究区域概况

安徽省位于中国的东南部,处于中纬度地区,地处暖温带与亚热带过渡区域。长江和淮河一南一北,横跨东西,故世称“江淮大地”。全省气候差异明显,降雨年际变化大。山区主要分布在皖西和皖南地区,地势海拔高;淮北和沿江区域主要为平原地带;江淮之间以丘陵地带为主。

2 数据与方法

2.1 数据

2.1.1 GRACE Level-2 RL06

目前,GRACE 重力卫星数据主要来自美国德克萨斯大学空间研究中心(Center for Space

Research, CSR)、德国地球科学研究中心(German research Center for Geosciences, GFZ)和喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)这 3 家官方机构。本文采用了 CSR 发布的 GRACE Level-2 的 RL06 月重力场模型球谐系数文件,简称 GRACE SH,阶数为 6 阶,时间为 2003 年 1 月至 2016 年 12 月,对于 GRACE 月解缺失的问题,采用三次样条法进行插值^[8]。数据预处理阶段,采用卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)提供的值替换重力场模型中的 C20 项系数^[9],并加入 Swenson 等计算的地心改正项^[10]。受冰川均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)引起的重力场长期变化趋势利用三维压缩地表负荷滞弹响应模型进行扣除^[11]。

2.1.2 Mascon 结果

选取 CSR 发布的质量块(mass concentration, Mascon) RL06 数据验证 GRACE SH 反演陆地水储量异常的可靠程度,该产品按月发布,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,并扣除 2004 年 1 月至 2009 年 12 月重力场球谐系数的平均值,经信号泄露改正、GIA 扣除等后处理,精度更优^[12]。相较于传统的球谐系数产品,无需做任何后处理。

2.1.3 GLDAS 水文模型

GLDAS 由美国航天航空局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)联合开发,采用了先进的数据同化技术,将卫星和地面观测数据集成到统一的模型中。本文选用 GLDAS V2.1 版本的 Noah 模型,在时间范围上与 GRACE 球谐数据保持一致,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。主要提取了模型中 4 层不同深度的从 0~2 m 的浅层土壤水、积雪融水和树冠积水。

2.1.4 热带降雨测量任务

TRMM 数据集是应用最广泛的降水产品,被用于气象、水文、生态等研究领域。TRMM 卫星降水产品可以有效弥补地面站稀疏、降水数据不足等问题。TRMM 3B43 产品是一种经过校正的后处理实时产品,时间分辨率为 1 个月,空间分辨率^[13]为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。本文选择了 2003—2016 年 TRMM 3B43 V7 版本的网格降水数据。

2.2 原理及方法

2.2.1 GRACE/GLDAS 反演地下水储量

GRACE 重力场模型中存在着高阶项噪声和南北“条带”等误差。本文采用组合滤波的方法,

即使用 300 km 的高斯滤波抑制高阶噪声,使用滑动窗口方法来消除同次奇偶阶球谐位系数之间的相关性,以减少“条带”误差^[5,14],陆地水储量变化反演结果的计算公式为:

$$\Delta h(\theta, \varphi) = \frac{\alpha \rho_{\text{ave}}}{3 \rho_{\text{wat}}} \sum_{l=0}^N \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm} \cos \theta W(l) \frac{2l+1}{1+k_l} \times (\Delta C_{lm} \cos(m\varphi) + \Delta S_{lm} \sin(m\varphi)) \quad (1)$$

其中: Δh 为等效水高; θ 为地心余纬; φ 为地心经度; α 为地球平均半径; ρ_{ave} 和 ρ_{wat} 分别为地球平均密度和水的密度; \bar{P}_{lm} 为规格化的缔合勒让德函数; $W(l)$ 为高斯平滑函数; k_l 为 l 阶负荷勒夫数; ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 表示地球重力场球谐系数相对于 C_{lm} 系数、 S_{lm} 系数平均值的变化量。

对 GLDAS 水文模型数据采用与 GRACE 相同的处理流程,即将原始格网数据球谐展开,截断至 60 阶,并扣除每月球谐系数的均值;采用与 GRACE 相同的组合滤波方法进行滤波;按照滤波后的时间序列与原始时间序列的残差平方和最小,计算尺度因子 k ,经过计算,安徽省的尺度因子为 1.62。采用尺度因子的方法对信号进行恢复^[15],改正泄露误差。

安徽省的地下水储量变化计算公式为:

$$\Delta_{\text{GWS}} = \Delta_{\text{TWS}} - (\Delta_{\text{SM}} + \Delta_{\text{SWE}} + \Delta_{\text{CWS}}) \quad (2)$$

其中: Δ_{TWS} 为 GRACE 反演的陆地水储量变化; Δ_{SM} 为土壤水储量变化; Δ_{SWE} 为积雪融水变化; Δ_{CWS} 为树冠积水变化。这 3 个分量都可以从 Noah 模型中提取。

2.2.2 SSA 原理

奇异谱分析是一种用于主成分分析的时间序列处理方法,可以将时间序列分解为趋势项、周期

项信号和噪声^[16],并提取有效成分进行序列重构。它不需要关于数学函数或随机模型的先验信息,因此适用于分析各类数据。具体原理和公式可以参考文献^[17],处理流程可简化如下。

对于长度为 N 的时间序列,根据窗口长度 M 建立轨迹矩阵 \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{N-M+1} \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{N-M+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_M & x_{M+1} & \cdots & x_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

然后,对构造矩阵 $\mathbf{S} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$ 进行奇异值分解,轨迹矩阵 \mathbf{X} 可以分解为:

$$\mathbf{x}_{i+j} = \sum_{k=1}^M a_i^k \mathbf{E}_j^k \quad (4)$$

其中: a_i^k 是时间序列主成分; \mathbf{E}_j^k 是相关特征向量。

根据所得的 a_i^k 和 \mathbf{E}_j^k ,原始序列的各个主成分重构序列可以表示为:

$$\mathbf{x}_i^k = \begin{cases} \frac{1}{i} \sum_{j=1}^M a_{ij}^k \mathbf{E}_j^k, & 1 \leq i \leq M-1; \\ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M a_{ij}^k \mathbf{E}_j^k, & M \leq i \leq N-M+1; \\ \frac{1}{N-i+1} \sum_{j=i-N+M}^M a_{ij}^k \mathbf{E}_j^k, & N-M+2 \leq i \leq N \end{cases} \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 陆地水储量时间序列结果

利用 GRACE SH、CSR Mascon 和 GLDAS Noah 计算的安徽省陆地水储量的时间序列结果如图 1 所示。

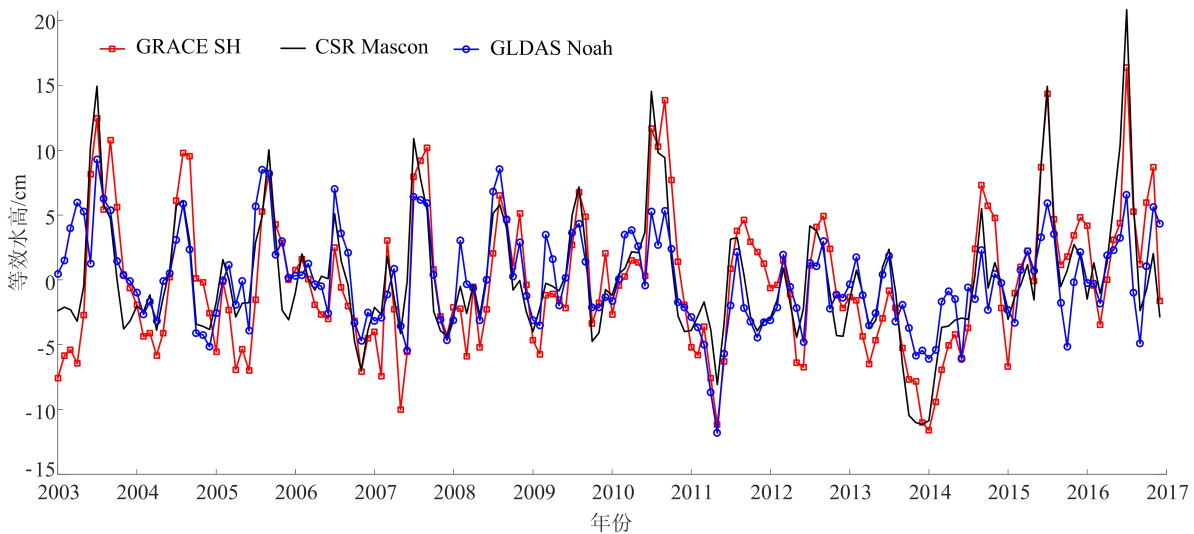


图 1 陆地水储量变化时间序列

基于最小二乘原理拟合出的周年振幅、半年振幅和线性变化率的具体数值见表 1 所列。

从图 1 和表 1 可以得出,GRACE RL06 SH 估算的周年振幅、半年振幅分别为 (4.30 ± 0.93) cm 和 (1.68 ± 0.93) cm,CSR RL06 Mascon 估算的周年振幅、半年振幅分别为 (3.76 ± 0.79) cm 和 (2.40 ± 0.79) cm,在时间序列上两者的变化基本保持一致,但 CSR RL06 Mascon

的整体线性趋势略低于 GRACE RL06 SH。GLDAS Noah 估算的周年振幅、半年振幅分别为 (1.98 ± 0.68) cm 和 (1.49 ± 0.68) cm,低于 GRACE RL06 SH 和 CSR RL06 Mascon,这由于模型中未考虑到地下水因素。GRACE RL06 SH 和 Mascon 线性拟合后的结果差异不大,GLDAS Noah 的线性拟合结果反映出在该时间段安徽省的陆地水储量有下降趋势,变化速率为 (-0.16 ± 0.12) cm/a。

表 1 2003 年 1 月—2016 年 12 月安徽省陆地水储量变化周年、半年振幅和线性趋势

时间序列	周年振幅/cm	半年振幅/cm	线性变化率/(cm/a)
GRACE RL06 SH	4.30 ± 0.93	1.68 ± 0.93	0.05 ± 0.16
CSR RL06 Mascon	3.76 ± 0.79	2.40 ± 0.79	-0.01 ± 0.14
GLDAS Noah	1.98 ± 0.68	1.49 ± 0.68	-0.16 ± 0.12

3.2 地下水储量时空变化分析

3.2.1 地下水储量变化时间序列分析

根据经验,GRACE 反演的结果中通常存在 12 个月的周期信号^[17],在执行 SSA 主成分分解时,滑动窗口的长度设为已知周期的倍数,并结合 Hossein 的理论^[18],窗口长度最终设置为 84 个月。

SSA 提取的时间序列的周期信号一般分布在前 20 阶,本文采用 w -correlation 方法^[19]判断前 20 阶重构成分(reconstruction component,RC)之间的分离程度^[17],对于相关性较好的相邻阶项的主成分,将其视为含有相同周期的周期对。SSA 结果如图 2 所示。

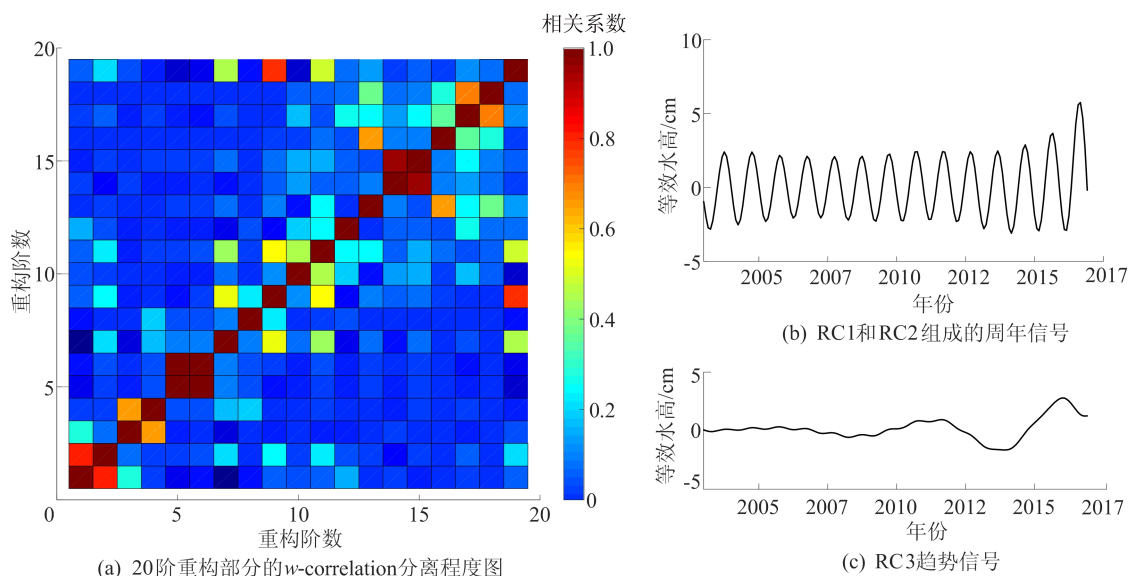


图 2 SSA 结果

从图 2a 可以看出,RC1 与 RC2 之间有很好的相关性,RC1+RC2 为具有年周期特征的信号,RC3 为趋势项。从图 2b 可以看出,安徽省的地下水储量变化有明显的周期特征。从图 2c 可以看出,安徽省地下水在 2011 年和 2014 年有较为明显的变化,主要表现为 2011 年以后下降,2014 年以后明显上升。

对地下水储量时间序列进行最小二乘线性拟合后,发现在 2003—2016 年地下水的变化率为 0.24 cm/a;在 2003—2011 年的变化率为 0.37 cm/a,在 2011—2014 年的变化率为 -0.2 cm/a,在 2014—2016 年的变化率骤升至 1.9 cm/a,相较于上一阶段有了明显的提升,这可能与降雨因素有关。

3.2.2 地下水储量空间变化分析

利用 GRACE SH 和 GLDAS 水文模型反演后的地下水储量空间变化以 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的格网等效水高表示。安徽省在 2003—2016 年陆地水、地表水和地下水的空间变化趋势如图 3 所示(基于全国地理信息资源目录服务系统网站审图号为 GS(2016)2556 号的标准地图制作,底图无修改)。从图 3 可以看出,地表水的变化率很小,地下水储量变化的空间分布与陆地水的空间分布极其相似,反映出地下水是影响安徽省陆地水储量

年际变化的最主要因素。安徽省的地下水储量衰减空间分布的差异性很明显,呈现出由东北向西南逐渐缓和的趋势。地下水亏损速率最为严重的区域出现在宿州市、淮北市北部和亳州市北部,最大的衰减速率达到 -7.52 mm/a ,这可能与皖北地区的矿业开采、农业生产方式以及气候驱动的降雨因素有关,而在中部的江淮平原区域基本维持平衡状态。在安庆、池州、黄山等市的地下水储量充沛,有所盈余,最大达到 8.38 mm/a 的上升速率。

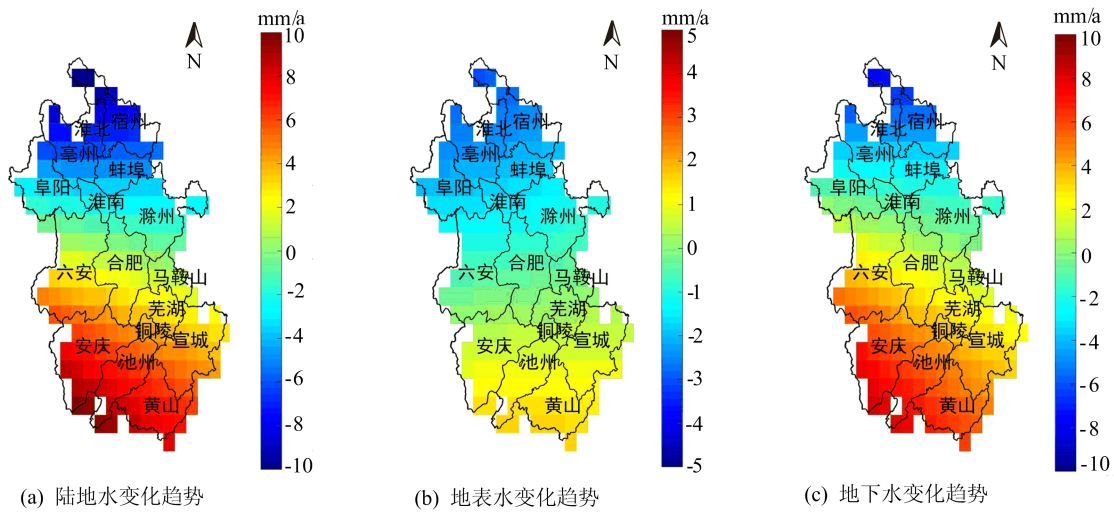


图 3 陆地水、地表水和地下水的空间变化趋势

3.3 GARCE 反演地下水与降水分析

进一步将安徽省地下水储量变化与降雨数据进行对比分析,结果如图 4 所示。图 4 中下半部

分下侧的柱状图为该时间段内每月的降雨量数据,上侧是 2003—2016 各个年份的总降雨量及年平均降雨量。

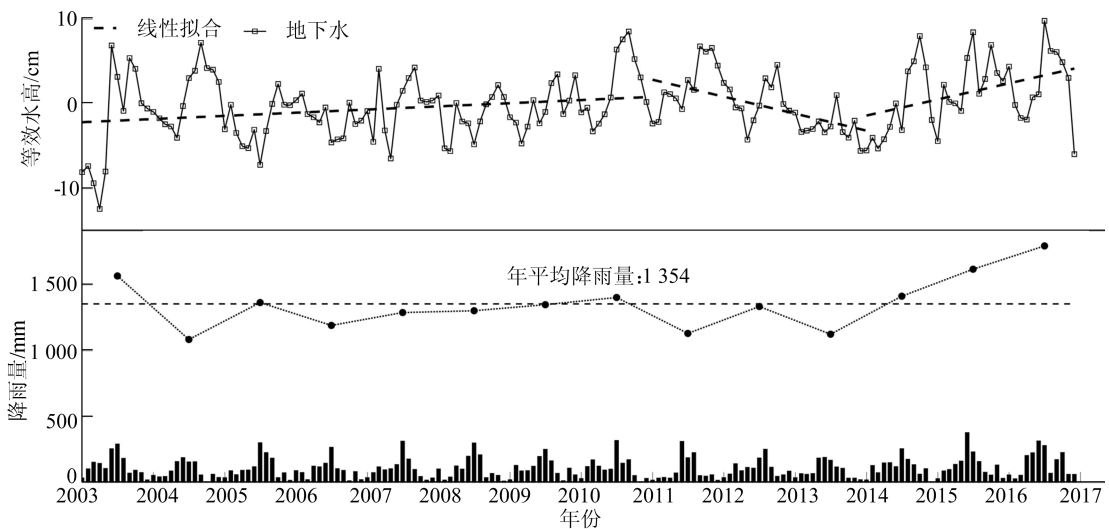


图 4 与降雨数据的对比结果

由图 4 可知:安徽省的降雨有很强的季节性特征,降雨量主要集中在夏季 6—8 月;其次为秋

季,两者的降雨量最高时可占全年的 80%左右;春季和冬季的降雨量较少。同样地,地下水储量的变化也具有季节性特征,在夏季和秋季水储量较为充沛,且多表现为上升状态,并达到峰值;在冬季和春季的水储量多为亏损,且呈下降状态。这表明降雨是安徽省地下水季节性变化的主要原因。

安徽省这些年的年降雨总量始终维持在动态平衡的状态,未发生明显干旱。通过各年的年降雨量来看,在 2006—2010 年和 2013—2016 年这 2 个时段,年降雨量呈上升趋势,对应时段的安徽省地下水也呈现良好的回升趋势;而在 2010—2012 年的年降雨量均低于均值,对应时段的地下水为下降状态。说明降雨较大影响了地下水储量的年际变化,对地下水起到较大补给作用,缓和 2011—2014 年地下水持续亏损的趋势。

4 结 论

本文利用 GRACE 重力卫星数据和 GLDAS Noah 水文模型反演了安徽省 2003 年 1 月至 2016 年 12 月的地下水储量异常变化,通过奇异谱分解时间序列,并结合降雨数据分析地下水的变化规律。研究表明:

1) GRACE RL06 SH 模型反演的陆地水储量异常值的周年振幅和时间序列变化趋势与 CSR Mascon RL06 的结果较为一致,GLDAS Noah 模型计算的地表水周年振幅和半年振幅均小于 GRACE SH 和 Mascon 结果,主要原因是模型中未包含地下水因素。

2) 利用 SSA 原理分解安徽省地下水时间序列,发现该序列有明显的周期特征,通过趋势项发现在 2011 年和 2014 年有较大波动,在 2003—2016 年地下水的变化率为 0.24 cm/a;在 2003—2011 年的变化率为 0.37 cm/a,在 2011—2014 年的变化率为 -0.2 cm/a,在 2014—2016 年的变化率为 1.9 cm/a,相较于上一阶段有明显的提升。

3) 在空间上,安徽省地下水变化呈现自东北向西南逐渐缓和的趋势。地下水亏损速率最严重的皖北地区最大的变化率达到 -7.52 mm/a,在西南地区有所盈余,最大达到 8.38 mm/a 的上升速率。

4) 结合降雨数据,发现安徽省 2003—2016 年的降雨维持动态平衡,无明显干旱现象。将降雨的月度变化和年总降雨量变化与地下水异常变化进行关联,发现降雨因素很大程度上影响

了地下水的年际变化和季节性变化。

[参 考 文 献]

- [1] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503-505.
- [2] 孙倩, 阿丽亚·拜都热拉. 基于 GRACE 卫星和 GLDAS 系统的地下水水位估算模型: 以和田地区克里雅河流域为例[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(7): 912-922.
- [3] FAMIGLIETTI J S, LO M, HO S L, et al. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(3): L03403.
- [4] SARKAR T, KANNAUJIYA S, TALOOR A K, et al. Integrated study of GRACE data derived interannual groundwater storage variability over water stressed Indian regions[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, 10: 100376.
- [5] 冯伟, LEMOINE J M, 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.
- [6] ZHANG C, DUAN Q, YEH P J F, et al. Sub-regional groundwater storage recovery in North China Plain after the South-to-North water diversion project[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126156.
- [7] 杨帅, 郑伟, 尹文杰, 等. 利用 GRACE 数据联合新型尺度因子校正法提高陆地水储量变化准确性[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(9): 3068-3082.
- [8] 陈智伟, 张兴福, 周波阳, 等. GRACE 月时变模型缺失值的填补方法与精度分析[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(3): 815-822.
- [9] CHENG M K, RIES J C, TAPLEY B D. Variations of the Earth's figure axis from satellite laser ranging and GRACE[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B1): B01409.
- [10] SWENSON S, CHAMBERS D, WAHR J. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B8): B08410.
- [11] WAHR J, ZHONG S. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 192(2): 557-572.
- [12] SCANLON B R, ZHANG Z, SAVE H, et al. Global evaluation of new GRACE mascon products for hydrologic applications[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(12): 9412-9429.
- [13] SUN Z, ZHU X, PAN Y, et al. Drought evaluation using the GRACE terrestrial water storage deficit over the Yangtze River Basin, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 634: 727-738.

向加速度大 85%左右,说明顶层部位易受鞭梢效应的影响从而增大楼层竖向加速度。

2) 隔震层位于第 7 层及以下时,隔震层位置升高,楼层竖向加速度和基底轴力均逐渐增大。但当隔震层位于第 9 层时,相较于隔震层位于第 7 层,楼层竖向加速度最大减小了 6.3%,基底轴力最大减小了 5.9%,说明在竖向地震作用下,隔震层上下部分结构的刚度变化会影响结构的楼层加速度和基底轴力,当上下部分刚度相差不大时,楼层加速度和基底轴力会有一定程度的降低。

3) 竖向 ElCentro 波、竖向 Taft 波和竖向天津波作用下的最大基底边柱轴力分别为 504、1 032、522 kN,说明在地震波加速度幅值相同的情况下,地震波的频率与结构的自振频率相近时,会产生结构基底轴力增大的现象,因此在抗震设计中尽量使结构的自振频率避开对应区域的多遇地震频率的范围,防止出现放大基底轴力的现象。

5 结 论

本文采用 Newmark 法基本理论对高层结构的竖向地震作用进行模拟,并用 ANSYS 有限元软件建立 20 层钢框架 Benchmark 有限元数值模型。分析隔震层分别位于第 1 层、第 3 层、第 5 层、第 7 层和第 9 层时竖向地震作用对楼层竖向位移、楼层位移角、楼层竖向加速度和基底轴力等竖向动力反应的影响,得到如下结论。

1) 3 种竖向地震作用下,层间隔震结构对高层结构的楼层竖向位移和楼层位移角的控制效果不理想,甚至会有不同程度的增大,但对基底轴力具有一定的控制效果。

2) 在隔震层位于第 7 层及以下时,随着隔震层位置的升高,高层结构的楼层竖向加速度和基底轴力均逐渐增大。但是当隔震层位于第 9 层

时,相较于隔震层位于第 7 层,楼层竖向加速度和基底轴力均会有一些减小。

3) 竖向 ElCentro 波、竖向 Taft 波和竖向天津波作用下的最大基底边柱轴力差别较为明显,因此地震波频率是影响结构基底轴力的重要因素。

[参 考 文 献]

- [1] 龚春玉. 竖向与水平地震作用下带 PSRC 空腹桁架转换层框架结构抗震性能分析[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [2] 邱文华,浦玉炳,张乾坤,等. 考虑竖向地震作用的拱式廊桥的地震响应分析[J]. 世界地震工程,2022,38(2):169-180.
- [3] 白国良,郝彬. 竖向地震作用下钢-钢筋混凝土塔式组合结构抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2019,52(3):12-19.
- [4] CHEN S X, HUANG Y Q. Vertical seismic analysis of roof truss in indonesia[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 804(4):1-6.
- [5] SITI M A R, MOHD Z A M Z, WAN M S W O, et al. Assessment of reinforced concrete building with soil structure interaction effect under vertical earthquake[J]. Materials Science Forum, 2016, 3950(857):331-336.
- [6] 段绍伟,陈伯望. 结构隔震技术及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2017:12-16.
- [7] 孙肇凯. 框架结构基础隔震设计关键技术及工程应用研究[D]. 济南:山东建筑大学,2019.
- [8] 阎启,傅晋申,周建龙. 上海徐泾车辆段上盖高层结构层间隔震设计[J]. 建筑结构,2022,52(9):132-138,103.
- [9] ZHANG S G, HU Y C, LI S H, et al. Study on seismic response characteristics of the interlayer isolation structure[J]. Journal of Vibroengineering, 2021, 23(8):1765-1784.
- [10] 涛涛. 地震作用下附设 TMD 的混合层间隔震体系振动控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [11] 欧进萍. 结构振动控制-主动、半主动和智能控制[M]. 北京:科学出版社,2003:496-509.

(责任编辑 张 镔)

(上接第 372 页)

- [14] SWENSON S, WAHR J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(8):L08402.
- [15] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D, et al. Recent La Plata basin drought conditions observed by satellite gravimetry[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D22):D22108.
- [16] GHIL M, ALLEN M R, DETTINGER M D, et al. Advanced spectral methods for climatic time series[J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40(1):1-41.
- [17] LI W, WANG W, ZHANG C, et al. Bridging terrestrial

water storage anomaly during GRACE/GRACE-FO gap using SSA method; a case study in China[J]. Sensor, 2019, 19(19):4144.

- [18] HASSANI H, MAHMOUDVAND R, ZOKAE M. Separability and window length in singular spectrum analysis[J]. Comptes Rendus Mathématique, 2011, 349(17/18):987-990.
- [19] HSIEH W W. Nonlinear multivariate and time series analysis by neural network methods[J]. Reviews of Geophysics, 2004, 42(1):RG1003.

(责任编辑 张 镔)