



利用ICA方法提取奥卡万戈三角洲水储量变化信号

王海波, 游为, 范东明, 熊宇昊, 李杰, 黄强

引用本文:

王海波, 游为, 范东明, 等. 利用ICA方法提取奥卡万戈三角洲水储量变化信号[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2022, 47(1): 93–103.

WANG Haibo, YOU Wei, FAN Dongming, et al. Using ICA to Extract the Water Storage Variations Signals of the Okavango Delta[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 93–103.

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>

[一种顾及IGS–RTS数据接收中断的厘米级星载GPS实时定轨方法](#)

A Centimeter-Level Real-Time Orbit Determination Method Using Space-Borne GPS Measurements Considering IGS–RTS Data Receiving Interruption

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1620–1626 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200432>

[尼泊尔Mw 7.8地震前后西藏西南部地区GPS时序特征演变分析](#)

Evolution of GPS Position Time Series Characteristics in Southwestern Tibet Pre- and Post- Nepal Mw 7.8 Earthquake

武汉大学学报 · 信息科学版. 2020, 45(4): 586–594 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180292>

[基于ICEEMD–ICA与MDP准则的变形监测数据去噪方法](#)

Denoising Method for Deformation Monitoring Data Based on ICEEMD–ICA and MDP Principle

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1658–1665 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190174>

[基于改进VMD的变形特征提取与分析](#)

Deformation Feature Extraction and Analysis Based on Improved Variational Mode Decomposition

武汉大学学报 · 信息科学版. 2020, 45(4): 612–619 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180286>

DOI:10.13203/j.whugis20190278



文章编号:1671-8860(2022)01-0093-11

利用 ICA 方法提取奥卡万戈三角洲水储量变化信号

王海波^{1,2} 游为¹ 范东明¹ 熊宇昊¹ 李杰² 黄强³

1 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756

2 中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉,430063

3 成都理工大学地球科学学院,四川 成都,610059

摘要:利用重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)时变地球重力场模型计算得到非洲奥卡万戈三角洲地区 2003-01—2014-12 的陆地水储量变化信息, 分别采用主成分分析(principal component analysis, PCA)和独立成分分析(independent component analysis, ICA)提取质量变化信号, 并与全球陆地数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)的水文模型进行对比。结果显示, 在奥卡万戈河流域东北部, 水储量表现出很强的周期性变化, 两种数据空间特征分布的信号出现在相同位置的成分 GRACE-IC1 和 GLDAS-IC1 对应的时间序列的相关系数达到 0.85。奥卡万戈三角洲地区水储量从 2003-01—2011-10 呈现上升趋势, 两种数据空间特征分布的信号出现在相同位置的成分 GRACE-IC2 和 GLDAS-IC3 对应的时间序列的相关系数达到 0.81, 说明 GRACE 反演结果与 GLDAS 水文模型反演结果在研究区域内具有很强的一致性。引入全球降水气候中心降水数据和 Water GAP 全球水文模型数据对研究区域陆地水储量变化的原因进行分析。实验结果表明, 相对于传统的多项式拟合方法, ICA 可以在较大区域内直接对特定位置质量变化信号的时空特征进行提取; 对比 GRACE 数据两种方法分解结果的第 3 成分可以看出, 在空间尺度和时间尺度上, ICA 方法对信号的分解能力要优于主成分分析方法。

关键词:重力恢复与气候实验;奥卡万戈三角洲;主成分分析;独立成分分析;水储量变化

中图分类号:P223

文献标志码:A

水资源一直是影响人类生产生活和社会发展的重要资源之一。作为全球水循环的重要组成部分^[1], 研究区域性陆地水储量变化可以更好了解一个地区的水储量变化特点, 这可为研究干旱、洪涝等极端自然灾害现象提供更好的帮助。奥卡万戈河是非洲第 4 长河, 全长约 1 600 km, 发源于安哥拉中部并流向东南, 最后注入博茨瓦纳北部卡拉哈里沙漠, 形成全球最大的内陆三角洲奥卡万戈三角洲, 流域总面积达 800 000 km², 其支流众多, 流域内动植物资源丰富, 奥卡万戈三角洲是全球最原始的湿地之一, 也是博茨瓦纳境内重要的旅游资源之一。现阶段, 中国提出要大力加强与非洲的合作, 由于目前博茨瓦纳等国家都面临水资源紧缺问题, 因此研究奥卡万戈三角洲地区的水储量变化, 有利于

人们了解其水循环的特点, 避免人们胡乱开采当地水资源导致三角洲遭到破坏, 也为保护该地区水系资源可持续发展提供基础资料。考虑到流域附近水域众多, 为避免其他水域水储量变化信号的相互混叠, 本文利用独立成分分析(independent component analysis, ICA)方法将整个区域的质量变化信号分解为相互独立的成分, 尽可能避免相互影响, 从而为具有多种水储量变化信号混叠区域的水储量变化研究提供帮助。

2002 年发射的重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)重力卫星为全球质量迁移和重分布提供了较大尺度的直接观测方法, 国内外众多学者将 GRACE 卫星数据广泛应用于区域性陆地水储量变化及全球海平面变化等方向的研究当中, 并取得了很多成果。

收稿日期:2020-04-21

项目资助:国家自然科学基金(41974013, 41574018, 41604068, 41404018)。

第一作者:王海波, 硕士, 主要从事卫星重力测量和精密工程测量研究。haibo0805w@foxmail.com

通讯作者:游为, 博士, 副教授。youwei1985@foxmail.com

Tapley 等^[2]利用 GRACE 实测数据成功监测到亚马逊流域的陆地水变化;Swenson 等^[3]利用 GRACE 数据计算了里海水储量变化,并结合外部数据验证了 GRACE 时变重力场模型研究水储量变化是可行的;李琼等^[4]利用 GRACE 数据成功探测出了 2010 年中国西南干旱时期陆地水储量变化;冯伟等^[5]、李圳等^[6]、苏晓莉等^[7]、束秋妍等^[8]均利用 GRACE 数据分析了华北平原的地下水储量变化特征;李武东等^[9]、姚朝龙^[10]利用 GRACE 数据分析中国天山地区的水储量呈下降趋势;卢飞等^[11]利用 GRACE 数据计算了中国地区陆地水的变化;Andersen 等^[12]利用 GRACE 和 GLDAS 数据计算分析了奥卡万戈三角洲 2003—2007 年的水储量变化,得出该地区水储量呈增加趋势。

利用 GRACE 数据计算所得的水储量变化信号带有噪声,国内外学者常利用数据滤波和信号提取来削弱噪声影响。对于信号提取方法除传统的多项式拟合外,使用较多的是主成分分析(principal component analysis, PCA),其原理是通过数据降维来提取变量场中的主要信号。Awange 等^[13]利用 PCA 探测了埃塞俄比亚 2003—2011 年的水储量变化特点;Frappart 等^[14]利用 PCA 方法成功探测出南美洲发生洪涝、干旱等极端自然灾害的变化规律。虽然 PCA 在主要信号提取方面具有一定的优势,但其所提取出的主成分表现为不相关,并不能将信号分解为相互独立的分量^[15]。为了加强分解效果,应在 PCA 的基础上加入高阶矩,尽可能将信号分解成为相互独立的分量 ICA。近年来,利用 ICA 方法分析水储量变化也取得了一系列成果。Forootan 等^[16-17]利用 ICA 方法结合 GRACE 等多种数据,分析了西非地区和澳大利亚的水储量变化;文汉江等^[18]利用 ICA 方法分析了青藏高原地区陆地水储量变化。

目前,国内外很少有学者利用 GRACE 时变重力场模型单独对奥卡万戈河流域水储量变化进行详细分析,更鲜有学者利用 PCA 和 ICA 方法对该地区水文信号进行提取。本文首先用 PCA 方法提取分析了非洲南部奥卡万戈三角洲及周边地区的水储量信息;然后,对 PCA 分解的空间特征进行旋转,实现 ICA 算法,并对 GLDAS (global land data assimilation system) 水文模型数据进行了相同尺度的 ICA 提取分析。结果表明,在奥卡万戈河流域东北部地区,水储量变化表现出很强周期性。相对于传统的多项式拟合方法,ICA 方法可以在较大区域内直接对特定位置质

量变化信号的时空特征进行提取。对比 GRACE 数据通过 PCA 方法和 ICA 方法分解的第 3 成分空间特征分布和时间序列可以看出,ICA 方法在空间上可以更好地将信号分离,在时间尺度上,也可提取出特定信号。由此可以看出,在本研究区域,ICA 方法对于信号分解的效果要好于 PCA 方法。

1 数据与方法

1.1 GRACE 数据

本文采用美国德克萨斯大学空间研究中心所提供的 2003-01—2014-12 的 GRACE RL06 时变地球重力场模型数据,分辨率 1 个月,在其数据处理过程中,已扣除高频海洋大气质量变化及各种潮汐的影响,所以 GRACE 时变重力场模型在陆地区域所反映的主要为陆地水储量变化信息。利用 GRACE 时变重力场模型计算等效水高的公式为^[19]:

$$\Delta H(\theta, \lambda) = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{1+k_l} W_l \times$$

$$\sum_{m=0}^l (\Delta \bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \quad (1)$$

式中, a 为地球平均半径, $a=6\ 378.137\ km$; $\bar{P}_{lm}(\cos\theta)$ 是完全规则化的缔合勒让德函数, 其中, m 和 l 为球谐位系数对应的次数和阶数; ρ_{ave} 表示地球平均密度, $\rho_{ave}=5\ 517\ kg/m^3$; ρ_w 表示水的平均密度, $\rho_w=1\ 000\ kg/m^3$; k_l 为顾及地球弹性形变的负荷勒夫数; (θ, λ) 表示地球表面某点的纬度和经度; W_l 为滤波函数。由于高阶次噪声的影响, 对球谐位系数截断到 60 阶。由于 GRACE 数据 2 阶项噪声较大, 利用卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR) 测得的 C_{20} 项代替 GRACE 的 C_{20} 项^[20]。采用半径为 300 km 的高斯滤波来降低球谐位系数的噪声, 并结合 Chen 等^[21]提出的 P3M6 去相关滤波来消除南北条带误差的影响。采用单一尺度因子方法对 GRACE 数据由于截断和平滑滤波等引起的泄露误差进行改正, 具体步骤为: 将研究区域内信号设为 1, 区域外设为 0, 对该信号球谐展开, 截断至与 GRACE 球谐位系数相同的阶次, 再进行与 GRACE 数据相同的滤波处理, 得到研究区域内的剩余信号, 此时的尺度因子为 1/剩余信号。

1.2 水文模型数据

水文模型数据采用由美国宇航局和美国海洋与大气局国家环境预报中心共建的 GLDAS 数

据,该模型是利用先进的地表建模和数据同化技术生成的最佳地表状态和通量场,被广泛应用于水文气象研究中^[22]。时间段选取与 GRACE 数据相同的 2003-01—2014-12,滤波方法采用与 GRACE 数据相同的方法进行处理。数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为 1 个月。

引入由全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Center, GPCC)收集全球众多气象站点降雨资料合成的全球降雨量数据集^[23],采用与 GRACE 数据相同的方法进行处理。数据空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间分辨率为 1 个月。该数据产品由美国海洋大气管理局的地球系统研究实验室提供。

利用 WaterGAP 全球水文模型(waterGAP global hydrology model, WGHM)数据来计算地下水变化,该模型数据对土壤水、雪水及地下水进行了严密估计,并多次被国内外学者运用到水储量变化的评估研究中^[24-26],由于只收集到 1960—2009 年的数据,因此,本文只利用了 2003-01—2008-12 的数据进行地下水计算,并采用与 GRACE 数据相同的方法进行处理。数据空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间分辨率为 1 个月。

1.3 ICA 方法基本原理

设利用 GRACE 重力场模型计算 m 个月的水储量变化信息,其中,每个月含 n 个观测点,则 m 个月的所有观测值可用矩阵 B 表示:

$$B = (B_1, B_2 \cdots B_n) = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & & & b_{2,n} \\ \vdots & & & \vdots \\ b_{m,1} & b_{m,2} & \cdots & b_{m,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $B_i (i \in [1, n])$ 为 $m \times 1$ 维列向量,表示第 i 个观测点对应不同月份的观测值。矩阵 B 的自协方差矩阵可表示为:

$$Q = \frac{1}{m} B^T B \quad (3)$$

矩阵 B 的 PCA 分解可表示为:

$$B_{m \times n} = PE^T \quad (4)$$

式中, E 由 B 的特征向量组成,代表 PCA 分解所得空间分布,在求解过程中,要对特征向量进行归一化处理,将特征值按照降序排列,并使得特征值和特征向量相对应; P 由主成分组成,代表 PCA 分解所得时间序列,分解得到的时间序列无实际物理意义,仅表示数值大小。

ICA 方法可以视为 PCA 方法的一种扩展方法,其目的是为了将 PCA 分解的时间序列或者空间特征尽可能分解为相互独立的成分^[27]。利用

ICA 算法对 PCA 所得时间序列或者空间特征进行旋转,得:

$$B_{m \times n} = P_r R_r R_r^T E_r^T = U_{m \times r} S_{r \times n}^T \quad (5)$$

式中, U 为源信号矩阵; S 为混合矩阵; r 表示所进行旋转的时间序列或者空间特征的数量; R 表示正交旋转矩阵($RR^T = I$),该矩阵一般是利用特征矩阵联合近似对角化方法计算得到。本文是利用 ICA 算法对 PCA 分解的空间特征进行旋转,使研究区域的信号在空间特征上尽可能表现为独立成分,对 ICA 分解所得结果进行分析时,要将空间特征和其所对应时间序列相结合进行分析。

2 GRACE 卫星数据处理结果分析

2.1 GRACE 反演水储量变化结果

本文研究区域选定为非洲南部($10^\circ\text{E} \sim 40^\circ\text{E}$, $24^\circ\text{S} \sim 3^\circ\text{N}$),该区域除奥卡万戈三角洲地区外,还有维多利亚湖、刚果河流域南部区域、坦噶尼喀湖、马拉维湖等地区,其概略位置关系见图 1。

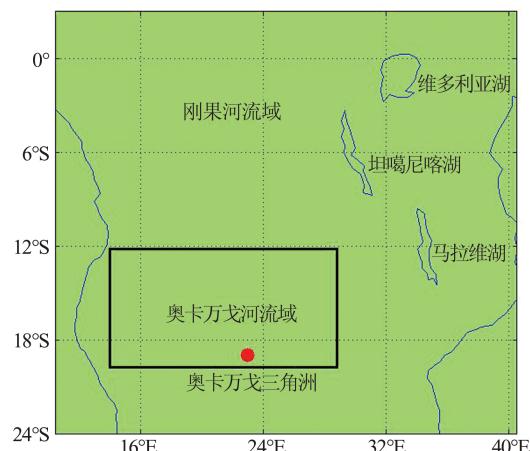


图 1 研究区域概况图

Fig.1 Survey Map of the Study Area

利用多项式拟合法拟合出研究区域 2003-01—2014-12 水储量变化的长期趋势如图 2 所示。该区域内水储量变化信号主要在奥卡万戈三角洲地区和维多利亚湖地区,因此,本文直接分析了奥卡万戈三角洲地区和维多利亚湖地区的水储量变化,其时间序列如图 3 所示。

由图 3 中奥卡万戈三角洲地区水储量的时间序列可以看出,该地区水储量变化有很强的年周期性,并且在 2006—2012 年呈现上升趋势,这与该地区实际情况相符合,实际资料显示,在 2004—2012 年,奥卡万戈三角洲地区年降水量与前 25 年相比,增加了约 15%。利用 GPCC 降雨数据计算的 1994-01—2003-12 和 2004-01—2011-12

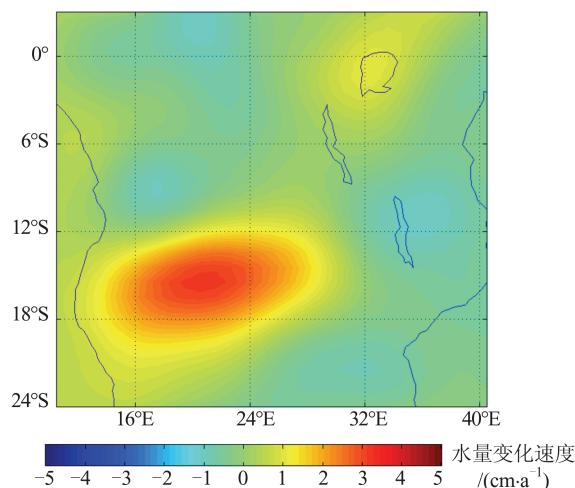


图2 研究区域水储量变化长期趋势

Fig.2 Trend Map of Mass Variations of the Study Area

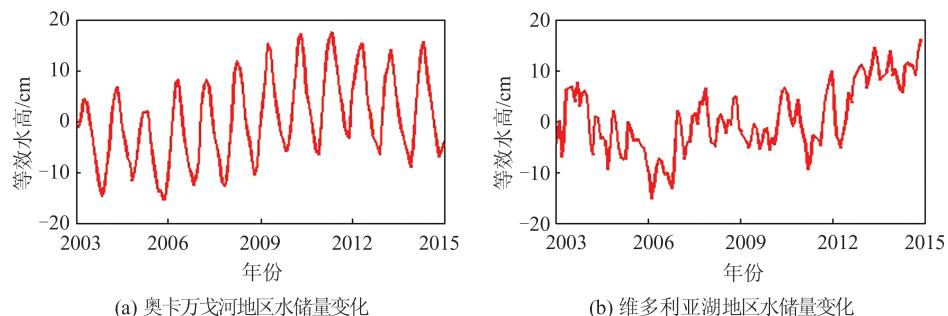


图3 由GRACE数据计算研究区域特征性水储量变化信息

Fig.3 Characteristic Change Information of Water Variations in the Study Area Calculated by GRACE Data

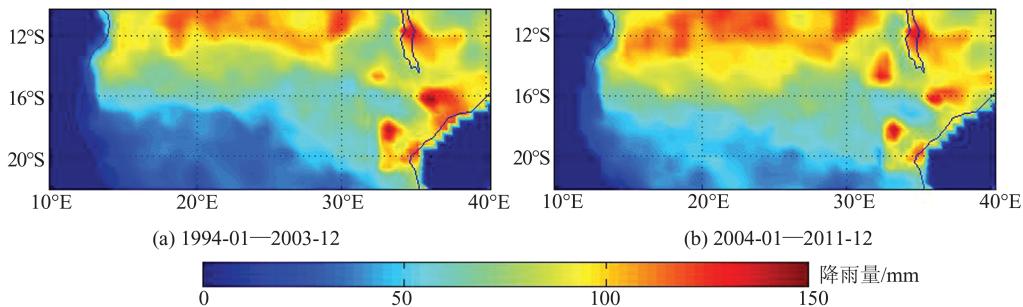


图4 2004年前10年和后8年月平均降雨量

Fig.4 Monthly Average Rainfall in the First 10 Years and Last 8 Years of 2004

表1 两区域不同时间段水储量变化趋势

Tab.1 Trend of Water Variation in Two Regions in Different Periods

区域	时间/年	趋势/(cm·a⁻¹)
奥卡万戈河地区	2003—2011	1.7
	2012—2014	-0.4
维多利亚湖地区	2003—2006	-5.1
	2007—2011	0.3
	2012—2014	3.1

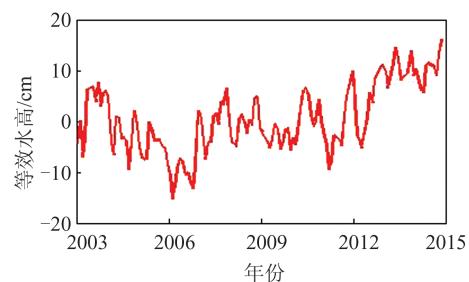
2.2 PCA 分解

将图1所示的整个研究区域按照经纬度分割为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的格网等效为观测点,即该区域共有868

的月平均降雨量如图4所示。

经计算,奥卡万戈河流域1994-01—2003-12的月平均降雨量为72.25 mm,2004-01—2011-12的月平均降雨量为82.31 mm,即后8年较前10年月平均降雨量增加了13.9%。从图3维多利亚湖地区水储量变化的时间序列可以看出,维多利亚湖地区的水储量在2007年前呈现出下降趋势,这是因为2003—2006年东非发生过干旱,且在2006年达到最小值,这与2006年东非严重干旱相吻合;在2007—2011年相对平稳,在2011—2014年呈现出上升趋势。

结合图3中两个地区的时间序列变化特点,以不同时间节点将整个研究时段分开拟合出两个地区在不同时间段内的变化趋势如表1所示。



(b) 维多利亚湖地区水储量变化

个观测点,将平铺在格网上的等效水高值作为观测值来构造矩阵。在对整个研究区域解释率达到95%的情况下,提取出了11个主成分,特征值及累计方差贡献率如图5所示。

图5中,前3个主成分的累计方差贡献率达到了90.2%,其中,PC1、PC2、PC3的方差贡献率分别达到了70.5%、11.6%和8.1%。由PCA方法的实际意义可知,前3个成分已经包含了该变量场中的主要信息,即前3个主成分可以解释该区域内的主要水储量变化情况。前3个主成分的空间特征分布及相对应的时间序列见图6和图7。

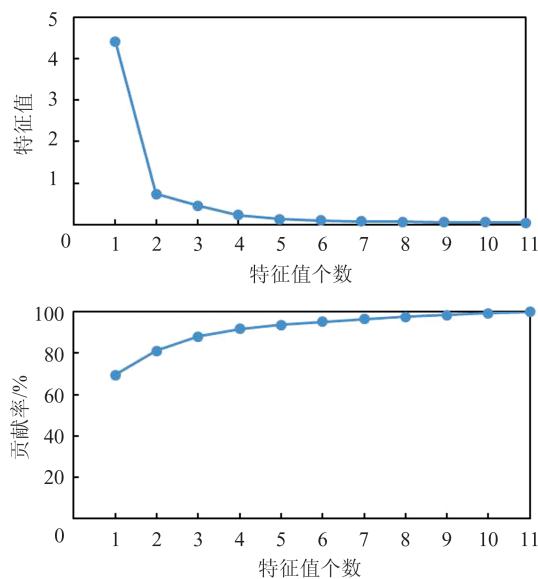


图 5 PCA 分解的特征值及方差贡献率

Fig.5 Eigen Value and Variance Contribution of PCA

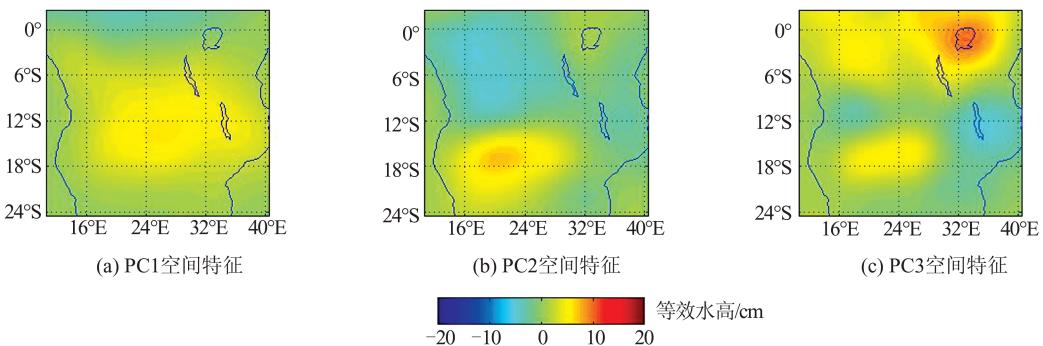


图 6 PCA 分解前 3 个成分的空间特征分布

Fig.6 Spatial Feature Distribution of the First Three Components in PCA Decomposition

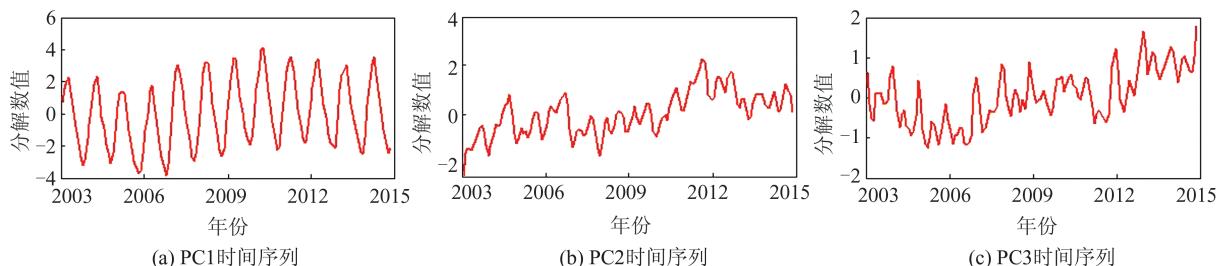


图 7 PCA 分解前 3 个成分的时间序列

Fig.7 Time Series of the First Three Components in PCA Decomposition

图 6(c) 中 PC3 的空间特征分布表示出的最强信号在维多利亚湖地区。图 7(c) 中 PC3 的时间序列也表现出的是周期信号和长期趋势的混合。可以看出,2006 年附近水储量明显小于其他年份,这与 2006 年东非地区干旱相符合。从 PC3 时间序列还可看出,在 2011—2014 年水储量表现为缓慢增加,且 PC3 的空间特征分布在维多利亚湖区域显示为正值。两者相结合分析可得,2011 年后维多利亚湖地区的水储量呈缓慢增加趋势。

从图 6(a) 中 PC1 的空间特征分布可以看出,PC1 中强信号主要集中在奥卡万戈河流域东北部与赞比亚境内,且为正值。从图 7(a) 中 PC1 的时间序列可以看出,该地区水储量变化呈现出很强的季节周期性,结合空间特征分布和时间序列可以看出,从 2006 年以后呈现出缓慢增加的趋势。

从图 6(b) 中 PC2 的空间特征分布看出,在奥卡万戈河流入奥卡万戈沼泽的汇集地区域出现了较强的信号;从图 7(b) 可以看出,PC2 的时间序列是周年信号和半年信号及长期趋势的混合,且呈现出增加的长期趋势,PC2 的空间特征分布在该地区的信号显示为正值。因此,可以分析在奥卡万戈三角洲地区水储量呈现增加趋势,这与实际资料显示该地区水储量增加的信息相符合。

2.3 ICA 分解

在 PC3 的空间特征分布中,虽然最强信号出现在维多利亚湖区域,但是在维多利亚湖区域西侧的刚果河流域和奥卡万戈三角洲区域都有很明显的信号,这导致图 7 中 PC3 的时间序列不能代表维多利亚湖的主要变化,还受到其他较强信号的影响。为了改善 PCA 的分解结果,将区域性特征信号更好地分解出来,把上述 PCA 分解出的空间特征分布进行旋转,进行 ICA 分解,得到分解后的空间分布特征和时间序列分别见图 8 和图 9。

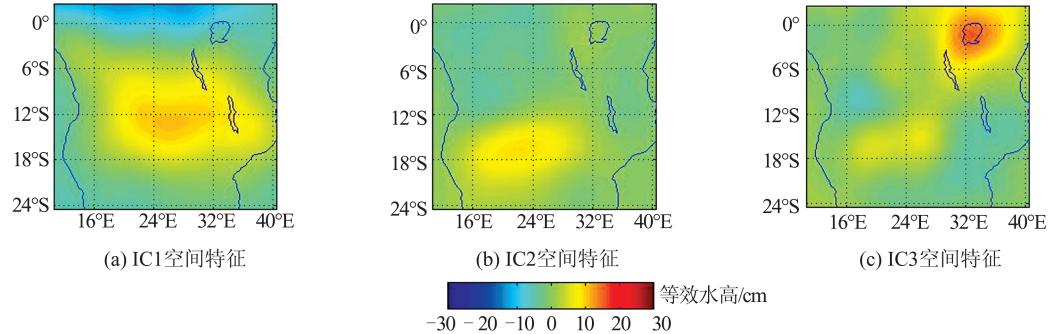


图8 ICA分解前3个成分的空间特征分布

Fig.8 Spatial Feature Distribution of the First Three Components in ICA Decomposition



图9 ICA分解前3个成分的时间序列

Fig.9 Time Series of the First Three Components in ICA Decomposition

从图8中IC1和IC2的空间特征分布来看,ICA分解的前两个成分和PCA分解的前两个成分的信号大致相同;IC3与PC3的空间特征分布图相比,很明显强信号更加集中在维多利亚湖区域,而PC3出现的刚果河流域和奥卡万戈三角洲的较强信号在IC3的空间特征分布很小,不会对维多利亚湖地区的较强信号造成影响。

结合图9中的IC1和IC2的时间序列来看,IC1和PC1的时间序列基本相同;IC2和PC2的时间序列变化趋势相同,只在个别年份有所不同。IC3时间序列在2006年的水储量明显减小到邻近年份的最低值,与图3中维多利亚湖地区水储量时间序列中情况吻合,比图7中PC3的时间序列的特征信号的表现更加明显。与PCA相比,ICA不仅在空间上将信号尽可能分离成独立信号,而且在时间尺度上提取出特定信号。与多项式拟合方法相比,ICA不需要建立拟合模型和任何先验信息,且不需要单独针对特定区域或者特定点,可以同时提取较大区域变量场中质量变化的时空特征信号,减少了模型误差及选取区域不合适等问题带来的困扰。

3 水文数据处理结果分析

采用与处理GRACE数据相同尺度的ICA方法处理GLDAS水文模型数据,在累计方差贡献

率达到90%的情况下,提取出了前4个成分。ICA方法分解GLDAS数据前4个成分的空间特征分布和对应的时间序列如图10和图11所示。

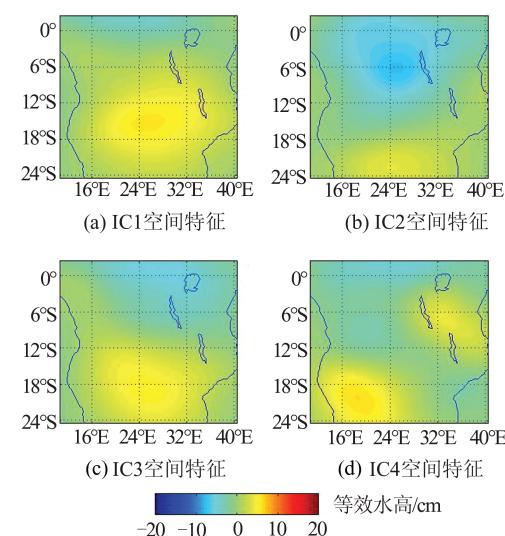


图10 ICA分解前4个成分的空间特征分布

Fig.10 Spatial Feature Distribution of the First Four Components in ICA Decomposition

从图10中IC1的空间特征分布可以看出,GLDAS的分解结果与GRACE分解结果在第1成分中都显示了奥卡万戈河流域东北部与赞比亚境内的信号。结合图11中IC1的时间序列可以看出,GLDAS水文数据在该地区也表现出很强的周期性变化。

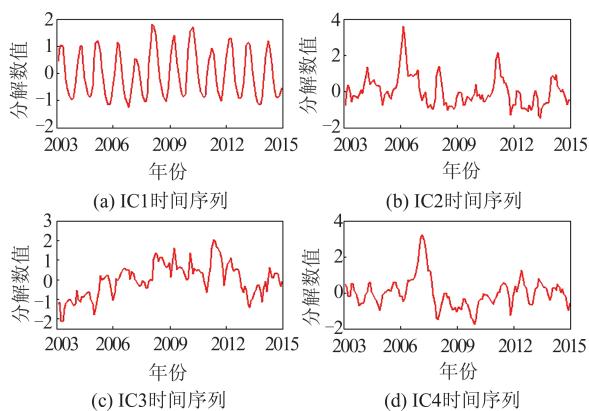
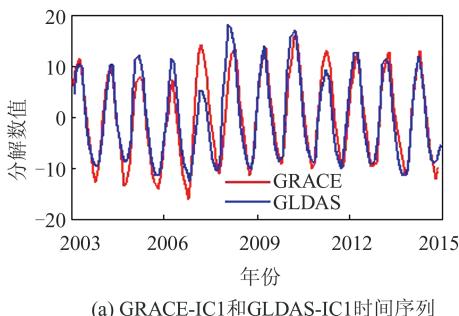


图 11 ICA 分解前 4 个成分的时间序列

Fig.11 Time Series of the First Four Components in ICA Decomposition

由图 10 中 IC2 的空间特征分布可以看出,信号主要出现在奥卡万戈三角洲北部的刚果河流域东南部地区。图 11 中 IC2 的时间序列是长期趋势和周期性信号的混合。总体来看,其长期趋势呈现出缓慢下降的特征,在 IC2 的空间特征分布中,该地区的信号呈现负值,其时间序列和空间特征相乘表示水储量变化重构值,因此,该地区水储量呈现出缓慢增加的趋势。

由图 10 中 IC3 的空间特征分布可以看出,信

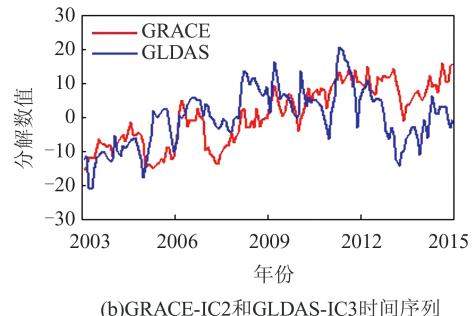


(a) GRACE-IC1 和 GLDAS-IC1 时间序列

号主要出现在奥卡万戈三角洲地区,该信号与 GRACE-IC2 信号位置相同,说明 GRACE 计算结果与 GLDAS 水文数据的计算结果在该地区符合得很好。图 11 中 IC3 的时间序列呈现出先上升后下降趋势,且在上升期内与 GRACE-IC2 的时间序列趋势相同。GLDAS 水文数据的 IC4 的信号也出现在奥卡万戈三角洲的西南部地区,时间序列显示了一定的周期性信号。而对于 GRACE-IC3 中出现的维多利亚湖地区的信号,在 GLDAS 结果中却没有显示,这是由于 GLDAS 数据所表示的水储量是陆地表层水,不包含地下水和内陆湖泊水,而 GRACE 所表示的水储量是表层水和地下水的一个综合信息的反映,因此,GLDAS 数据在维多利亚湖区域信号不明显。

4 结果对比分析

为了更直观地对比 GRACE 数据处理结果与 GLDAS 数据处理结果是否具有相似性,以便验证 GRACE 数据所得结果的正确性,本文对两者空间特征分布信号位置相同的成分所对应的时间序列进行了相关性分析,结果如图 12 所示。



(b) GRACE-IC2 和 GLDAS-IC3 时间序列

图 12 GRACE 和 GLDAS 相似成分结果对比

Fig.12 Comparison of Similar Compositions Between GRACE and GLDAS

GRACE-IC1 和 GLDAS-IC1 的空间特征分布中的信号出现在相同位置,因此,图 12(a)将 GRACE-IC1 和 GLDAS-IC1 进行了相关性分析。可以看出,两者的结果在此区域都显示出很强的周期性,说明第 1 成分所提取出的是该地区的 1 个周期性信号,相关系数为 0.85,表示两者结果为极强相关。GRACE-IC2 和 GLDAS-IC3 空间特征分布的信号出现在相同位置,两者的相似信号没有出现在同一成分,是由于 GRACE 数据和 GLDAS 数据的模型及对变量场中所含成分占比不同等因素导致的。从图 12(b)中可以看出,两者在上升阶段,整体趋势基本相同,为了更好地对比分析两者在长期趋势上的相似性,对两者的时

间序列进行了 13 点滑动平均处理,可扣除季节性波动的影响,处理结果如图 13 所示。

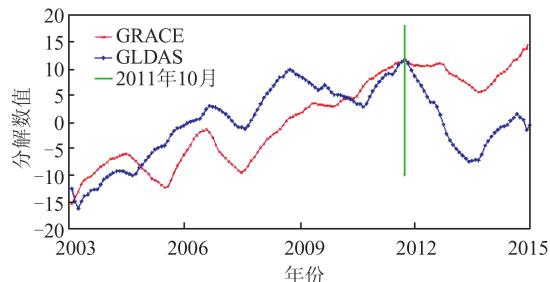


图 13 GRACE-IC2 和 GLDAS-IC3 时间序列 13 点滑动平均结果对比

Fig.13 Comparison of 13-Point Moving Average Results of GRACE-IC2 and GLDAS-IC3 Time Series

经过13点滑动平均处理后,可以明显看出,在2011-10(图13中绿线)前,GRACE和GLDAS的数据结果均呈现出上升趋势,相关系数为0.81,为极强相关,说明该地区水储量在2011-10前呈增加趋势。在2004-08—2005-07, GLDAS的数据结果呈上升趋势,而GRACE的数据结果表现为下降趋势,原因是该时间段水储量变化主要受到地下水影响。利用WGHM水文模型计算出该地区2003-01—2008-12的地下水变化,结果如图14(a)所示。对该结果进行13点滑动平均处理,再将GRACE的结果和GLDAS的结果进行对比,如图14(b)所示。

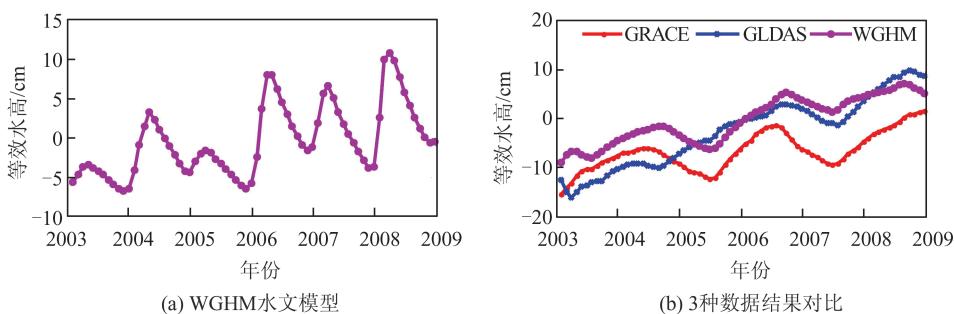


图14 WGHM水文模型计算地下水变化结果

Fig.14 WGHM Hydrological Model Calculates Groundwater Variation Results

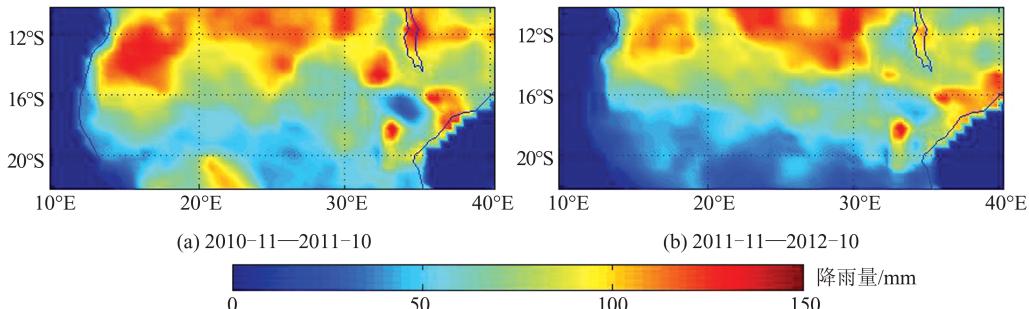


图15 2011-10前后1年平均降雨量

Fig.15 Monthly Average Annual Rainfall of One Year Before and After October 2011

对于GLDAS数据的下降趋势要比GRACE数据的下降趋势更快,这是由于前面所述的GRACE和GLDAS数据本身的差异导致的, GLDAS数据只含有陆地表层水,因此,对于地表水的减少反映更加灵敏,而GRACE数据反映的是地表水及地下水的一个综合信息反映。

5 结语

本文利用GRACE时变重力场模型数据分析了非洲南部奥卡万戈三角洲及周边地区的水储量变化,利用PCA方法和ICA方法对结果进行分解,并对结果进行了分析。将GLDAS水文模型

从图14可以看出,在2004-08—2005-07,地下水变化与GRACE的结果均表现为下降趋势,证明了水储量变化确实受地下水变化主导。在2011-10—2013年底,该地区水储量呈下降趋势,2011-10前一年(2010-11—2011-10)和后一年(2011-11—2012-10)平均降雨量对比见图15。

从图15可以看出,2010-11—2011-10,该地区月平均降雨量为85.78 mm,2011-11—2012-10,该地区月平均降雨量为78.34 mm,同比减少了9.5%,因此,该时间段水储量下降是由于2011-10后一年(2011-11—2012-10)降雨量比前一年(2010-11—2011-10)减少,导致地表水迅速减少。

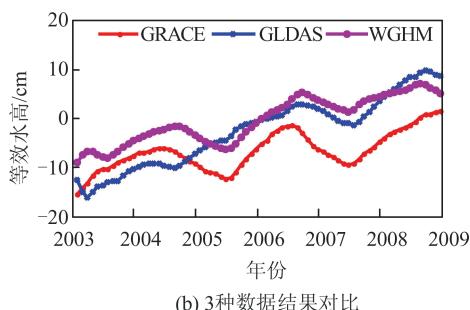


图15 2011-10前后1年平均降雨量

数据与GRACE数据进行相同的滤波处理,利用与GRACE数据相同尺度的ICA方法进行分解,结合GPCC降雨数据和WGHM水文模型数据对该地区水储量变化特点进行分析,所得结论如下:

- 1) 非洲奥卡万戈河流域地区东北部水储量变化显示出很强的周期性信号,且GRACE数据和GLDAS数据计算结果符合程度较高,相关系数达到0.85,表现为极强相关,验证了GRACE数据分析水储量结果的正确性。

- 2) 在奥卡万戈三角洲区域水储量长期变化趋势方面,该地区GRACE数据计算结果和GLDAS数据计算结果在2003-01—2011-10的整个

水储量上升期内,去除季节性波动影响后,两者结果符合很好,相关系数达到 0.81,说明了该地区水储量在 2003-01—2011-10 之间呈增加趋势,这与该地区实际情况相符,2004—2012 年该地区降雨量增加导致水储量增加。而在 2010-10 后,降雨量明显减少导致地表水减少,因此,GLDAS 计算结果迅速下降,而 GRACE 相对下降较为缓慢,这是由于两种数据含量不同导致的结果,GLDAS 数据只含有陆地表层水,而 GRACE 所表示的水储量信息是地表水及地下水的综合反映。

3) 在不需要先验信息的情况下,ICA 方法可以将变量场的信息尽可能地分解成相互独立的成分,并且能够得到每个信号的空间特征分布和相对应的时间序列,这有助于分离一个地区不同特征的水文信号,并进行单独的定性分析。且在空间和时间上,ICA 方法对信号的分解能力都要强于 PCA 方法。因此,ICA 方法更加适用于对区域内部复杂信号的分离提取分析。

参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] Tapley B D, Byron D, Bettadpur S, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503-505
- [3] Swenson S, Wahr J. Multi-sensor Analysis of Water Storage Variations of the Caspian Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(16): 245-250
- [4] Li Qiong, Luo Zhicai, Zhong Bo, et al. Terrestrial Water Storage Changes of the 2010 Southwest China Drought Detected by GRACE Temporal Gravity Field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(6): 1843-1849 (李琼,罗志才,钟波,等. 利用 GRACE 时变重力场探测 2010 年中国西南干旱陆地水储量变化[J]. 地球物理学报,2013,56(6): 1843-1849)
- [5] 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)
- [6] Li Zhen, Zhang Chuanyin, Ke Baogui, et al. North China 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)
- [7] Su Xiaoli, Ping Jinsong, Ye Qixin. Terrestrial Water Variations in the North China Plain Revealed by the GRACE Mission [J]. *Scientia Sinica: Terra*, 2012, 42 (6) :917-922 (苏晓莉,平劲松,叶其欣. GRACE 卫星重力观测揭示华北地区陆地水量变化[J]. 中国科学:地球科学, 2012,42(6):917-922)
- [8] Shu Qiuyan, Pan Yun, Gong Huili, et al. Spatio Temporal Analysis of GRACE-Based Ground Water Storage Variation in North China Plain [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(2):132-137(束秋妍,潘云,宫辉力,等. 基于 GRACE 的华北平原地下水储量时空变化分析[J]. 国土资源遥感,2018,30(2): 132-137)
- [9] Li Wudong, Guo Jinyun, Chang Xiaotao, et al. Terrestrial Water Storage Changes in the Tianshan Mountains of Xinjiang Measured by GRACE During 2003—2013 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(7):1021-1026 (李武东,郭金运,常晓涛,等. 利用 GRACE 重力卫星反演 2003—2013 年新疆天山地区陆地水储量时空变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(7):1021-1026)
- [10] Yao Chaolong. Natural-and Human-Induced Impacts on Regional Terrestrial Water Storage Changes from GRACE and Hydro-Meteorological Data [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017 (姚朝龙. 联合 GRACE 和水文气象数据研究自然与人为因素对区域水储量变化的影响[D]. 武汉:武汉大学,2017)
- [11] Lu Fei, You Wei, Fan Dongming, et al. Chinese Continental Water Storage and Ocean Water Mass Variations Analysis in Recent Ten Years Based on GRACE RL05 Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(2): 160-167(卢飞,游为,范东明,等. 由 GRACE RL05 数据反演近 10 年中国大陆水储量及海水质量变化[J]. 测绘学报, 2015,44(2):160-167)
- [12] Andersen O B, Krogh P E, Bauer-Gottwein P, et al. Terrestrial Water Storage from GRACE and Satellite Altimetry in the Okavango Delta (Botswana) [J]. *Gravity, Geoid and Earth Observation*, 2010, 135(69):521-526

- [13] Awange J L, Gebremichael M, Forootan E, et al. Characterization of Ethiopian Mega Hydrogeological Regimes Using GRACE, TRMM and GLDAS Datasets [J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 74 (12):64-78
- [14] Frappart F, Seoane L, Ramillien G. Validation of GRACE-Derived Terrestrial Water Storage from a Regional Approach over South America[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 137(8):69-83
- [15] Cardoso J F. Fourth-Order Cumulant Structure Forcing: Application to Blind Array Processing [C]. Statistical Signal and Array Processing, Victoria, BC, Canada, 1992
- [16] Forootan E, Kusche J, Loth I, et al. Multivariate Prediction of Total Water Storage Changes over West Africa from Multi-matellite Data[J]. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35(4): 913-940
- [17] Forootan E, Awange J L, Kusche J, et al. Independent Patterns of Water Mass Anomalies over Australia from Satellite Data and Models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 427-443
- [18] Wen Hanjiang, Huang Zhenwei, Wang Youlei, et al. Independent Component Analysis of Water Storage Changes Interpretation over Tibetan Plateau and Its Surrounding Areas [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(1):9-15 (文汉江, 黄振威, 王友雷, 等. 青藏高原及其周边地区水储量变化的独立成分分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(1):9-15)
- [19] 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
- [20] Thornthwaite C W. An Approach Toward a Rational Classification of Climate [J]. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94
- [21] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. GRACE Detects Coseismic and Postseismic Deformation from the Sumatra - Andaman Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13): 173-180
- [22] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The Global Land Data Assimilation System [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85 (3) : 381-394
- [23] Wan H , Zhang X B, Zwiers F W , et al. Effect of Data Coverage on the Estimation of Mean and Variability of Precipitation at Global and Regional Scales [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(2):534-546
- [24] Döll P, Kaspar F, Lehner B. A Global Hydrological Model for Deriving Water Availability Indicators: Model Tuning and Validation [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 270(1/2):105-134
- [25] Werth S, Güntner A. Calibration Analysis for Water Storage Variability of the Global Hydrological Model WGHM [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2010, 14(1): 59-78
- [26] Schmidt R, Petrovic S, Güntner A, et al. Periodic Components of Water Storage Changes from GRACE and Global Hydrology Models [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113 (B8): B08419
- [27] Forootan E, Kusche J. Separation of Deterministic Signals Using Independent Component Analysis (ICA) [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2013, 57(1):17-26

Using ICA to Extract the Water Storage Variations Signals of the Okavango Delta

WANG Haibo^{1,2} YOU Wei¹ FAN Dongming¹ XIONG Yuhao¹ LI Jie² HUANG Qiang³

¹ Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

² China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan 430063, China

³ College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Objectives: Studying regional land water storage changes can better understand the characteristics of water storage changes in an area, and provide better help for the study of extreme natural disasters such as drought and flood. Methods: To verify the signal decomposition ability of independent component analysis(ICA), the water storage variations in Africa's Okavango delta region from January 2003 to December 2014 was calculated using gravity recovery and climate experiment (GRACE) time-varying earth gravi-

ty field model, and the mass change was extracted by principal component analysis and ICA respectively, which was compared with the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) hydrological model. **Results:** The results show periodic changes of the water reserves in the northeast of Okavango river, and the correlation coefficient of the time series corresponding to GRACE-IC1 and GLDAS-IC1 between the two datasets of spatial feature distribution in the same position reaches 0.85. The water variations in the Okavango delta area increase from January 2003 to October 2011, the correlation coefficient of the time series corresponding to GRACE-IC2 and GLDAS-IC3 between the two datasets of spatial feature distribution in the same position reaches 0.81. It indicates that GRACE agrees with the GLDAS hydrological model very well in the research area. In addition, Global Precipitation Climatology Center precipitation data and WaterGAP Global Hydrology Model data were introduced to analyze the variation of terrestrial water reserves in the study area. **Conclusions:** Compared to the traditional polynomial fitting method, the ICA can directly extract the spatial-temporal characteristics of the quality change in a specific location in a large area. By comparing the third component of the analysis results of the two GRACE methods, it can be seen that the ICA has stronger decomposition ability than the principal component analysis.

Key words: gravity recovery and climate experiment (GRACE); the Okavango delta; principal component analysis(PCA); independent component analysis(ICA); water storage variations

First author: WANG Haibo, master, specializes in satellite gravity measurement and precision engineering measurement. E-mail: haibo0805w@foxmail.com

Corresponding author: YOU Wei, PhD, associate professor. E-mail: youwei1985@foxmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41974013, 41574018, 41604068, 41404018).

引文格式: WANG Haibo, YOU Wei, FAN Dongming, et al. Using ICA to Extract the Water Storage Variations Signals of the Okavango Delta[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(1):93–103. DOI:10.13203/j.whugis20190278(王海波,游为,范东明,等.利用 ICA 方法提取奥卡万戈三角洲水储量变化信号[J].武汉大学学报·信息科学版,2022,47(1):93–103. DOI:10.13203/j.whugis20190278)