



利用GRACE反演昆士兰州地下水储量变化

仉 晋, 魏长寿, 滕 雷, 赵曰耀

Inversion of groundwater reserves changes in Queensland by GRACE

NAI Jin, WEI Changshou, TENG Lei, and ZHAO Yueyao

引用本文:

仉晋, 魏长寿, 滕雷, 等. 利用GRACE反演昆士兰州地下水储量变化[J]. 全球定位系统, 2022, 47(2): 32–37. DOI: [10.12265/j.gnss.2021071602](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021071602)
NAI Jin, WEI Changshou, TENG Lei, et al. Inversion of groundwater reserves changes in Queensland by GRACE[J]. *Gnss World of China*, 2022, 47(2): 32–37. DOI: [10.12265/j.gnss.2021071602](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021071602)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021071602>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于GRACE时变重力场模型研究印度河-恒河流域水储量变化

A research on water storage changes in the Indus–Ganges river basin based on GRACE time–varying gravity field
全球定位系统. 2020, 45(5): 103–107

重力场模型对Swarm卫星精密定轨的影响分析

Analysis of the effect of gravity field models on precise orbit determination of Swarm satellites
全球定位系统. 2021, 46(6): 11–15

利用GNSS掩星数据分析ENSO期间

Analysis of Atmospheric Pressure Changes During ENSO Using GNSS Occultation Data
全球定位系统. 2018, 43(5): 58–60

星载加速度计校准对GRACE轨道动力学平滑的影响分析

Analysis on the effect of calibration of satellite accelerometers on smooth GRACE orbit dynamics
全球定位系统. 2020, 45(6): 27–36

GNSS-R海面风速反演技术研究

Research on GNSS–R sea surface wind field Information Inversion technology
全球定位系统. 2020, 45(2): 55–59

基于GPS信噪比观测值的水位反演研究

Research on water level inversion based on GPS SNR data
全球定位系统. 2020, 45(1): 105–109



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

利用 GRACE 反演昆士兰州地下水储量变化

仵晋¹, 魏长寿², 滕雷¹, 赵曰耀¹

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 昆士兰州作为澳大利亚的第二大州, 开展针对该地区地下水储量变化的监测与分析对当地生态环境与用水管理政策制定具有重要现实意义. 利用德克萨斯大学空间研究中心 (CSR) 发布的重力反演与气候实验卫星 (GRACE) 时变重力场模型与全球陆地数据同化系统 (GLDAS) 地表同化模型, 对昆士兰州地下水储量时空变化进行监测分析, 并与实测水井数据和全球降水气候学项目 (GPCP) 降雨资料进行验证分析. 研究表明: 时间上昆士兰州地下水在 2003—2015 年约以 1.3 ± 0.09 cm/a 的速率递增, 空间上呈现东增西减的显著空间差异; 与 GPCP 降雨资料对比发现, 降雨是影响地下水储量变化的主要因素; 与水井实测数据对比发现地下反演结果与水井水位变化趋势基本一致.

关键词: 重力反演与气候实验卫星 (GRACE); 时变重力场; 全球陆地数据同化系统 (GLDAS); 地下水储量; 正向建模法

中图分类号: P231

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2022)02-0032-06

0 引言

水资源对于整个生态系统有着不可替代的作用, 其中地下水由于其水质好、分布广、易获取等特点被广泛应用于日常生活、农业灌溉和工业生产等领域. 传统的监测方法只能在局部空间尺度上进行有效监测, 却难以在较大空间尺度上实现地下水位变化监测, 不利于对地下水资源进行监测与管理. 有效监测地下水资源的分布和其动态变化并对其进行分析, 对当地生态环境与用水管理政策制定具有重要现实意义, 也是应对地下水资源匮乏的必要手段.

重力反演与气候实验卫星 (GRACE) 计划的实施^[1] 为水资源变化监测提供了新的途径, 能监测较大空间尺度上的重力场时变信息, 在短时间尺度内一般认为地球重力场变化主要是由于水的质量变化引起的. 目前 GRACE 时变重力场已被广泛应用于重大空间尺度上陆地水储量变化研究中. 如 LANDERER 等^[2] 在全球范围内, 结合 GRACE 数据和水文学模型拟合数据进行比较分析, 证实了 GRACE 数据可以用于陆地水储量变化监测. 此外, GRACE 卫星提供的月重

力场模型结合陆地水文资料或水文模型也可应用于地下水储量变化的监测. 国内外诸多学者利用 GRACE 卫星月重力场数据研究地下水储量变化取得显著成果, 如 CHEN 等^[3] 利用 GRACE 结合陆地地面模型分析发现澳大利亚维多利亚州的地下水一直呈现下降状态且降雨异常和年地下水储量密切相关; 周志才等^[4] 利用 GRACE 时变重力场模型结合地下水观测井数据发现 2003—2009 年淮河流域地下水储量以约 0.28 cm/a 的趋势递增; 谢小伟等^[5] 利用 GRACE 卫星重力场数据和全球陆地数据同化系统 (GLDAS) 水文模型反演陕甘晋高原 2005—2014 年地下水储量变化并对其进行时空分析, 得出陕甘晋高原地下水储量减少主要是由于人为活动造成的.

昆士兰州是澳大利亚的第二大州, 水资源处于长期短缺状态, 昆士兰州已成为澳大利亚第一个将循环水作为饮用水的州, 监测地下水储量变化对该地区的水资源管理以及水资源可持续利用具有重要意义. 本文利用 2003-01—2015-12 共 142 个月的 GRACE 时变重力场模型反演澳大利亚昆士兰州地下水储量变化, 并结合正向建模方法恢复研究区域信号, 总结其在空间与时间上的变化趋势. 结合地下水井实测数据

进行对比分析, 研究降雨对于昆士兰州地下水储量变化的影响。

1 数据与方法

1.1 GRACE 数据

本次反演采用的数据是美国德克萨斯大学空间研究中心 (CSR) 发布的最新版本 GRACE Level-2 的 RL06 月重力场模型数据, 由于高阶项信号基本被噪音覆盖, 所以采用最高阶数为 60 阶^[6]。低阶项数据误差较大, 采用卫星激光测距 (SLR) 解算的值替换月重力场模型中的 C20 项数据^[7], 并采用 Swenson 估算的一阶重力位系数来替代原有的一阶重力位系数^[8], 时变重力场球谐系数方法反演陆地水储量变化模型可描述为^[9]

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

式中: Δh 为等效水柱高; α 为地球平均半径; ρ_{ave} 为地球平均密度; ρ_{wat} 为地球水密度; \bar{P}_{lm} 为规格化的缔合勒让德函数; k_l 为一阶负荷 Love 数; ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 表示地球重力场球谐系数相对于基准重力场的变化量。

由于 GRACE 受卫星轨道误差、传感器误差以及模型误差等因素影响, 其重力场模型高阶项含有较多噪声和南北条带噪声^[10]。为了削弱这两种误差的影响, 本文采用 P4M15 去相关滤波和半径为 300 km 的高斯滤波组合滤波的方法对研究区域的 GRACE 数据进行滤波处理^[11]。经过去相关滤波和高斯滤波后, 在 GRACE 数据处理过程中, 对其球谐系数进行高阶项截断并对其进行使用高斯平滑滤波, 导致初始信号损失形成泄露误差。为了减小泄露误差的影响, 本文利用正向建模方法对信号进行恢复, 基本原理是通过多次迭代, 使得数据逐渐向真值逼近^[12]。

1.2 水文数据

1) GLDAS 水文模型

GLDAS 由 NASA 与 NCEP 共同建立, 包括 NOAH、VIC、CLM、MOSAIC 四种陆地表面模式。本文采用 2003-01—2015-12 的 GLDAS-Noah 水文模型数据, 其时间分辨率为 1 个月。利用该数据的积雪数据以及土壤水 (0~200 mm) 数据, 将其球谐展开至与 GRACE 相同阶次, 采用相同的滤波方法进行数据处理并对其进行去平均处理计算区域地表水储量变化。

2) 降雨数据

降雨数据为全球降水气候学项目 (GPCP) 数据。采用 2003-01—2015-12 的月降雨数据, 进行平均化处理得到昆士兰州月平均降雨数据。

3) 地下水井监测资料

地下水实测数据根据联合国教科文组织国际水文计划地下水门户网站 (<https://groundwaterportal.net/project/ggmn>) 下载。实测数据为昆士兰州监测井观测的地下水位埋深数据, 观测间隔为 1 天, 水位单位为 m。经过筛选, 最终从 20 444 口监测井中挑选出 128 个数据分布较好的地下水监测井, 监测水井分布如图 1 所示, 对监测水井数据进行去平均处理得出每月的变化值。

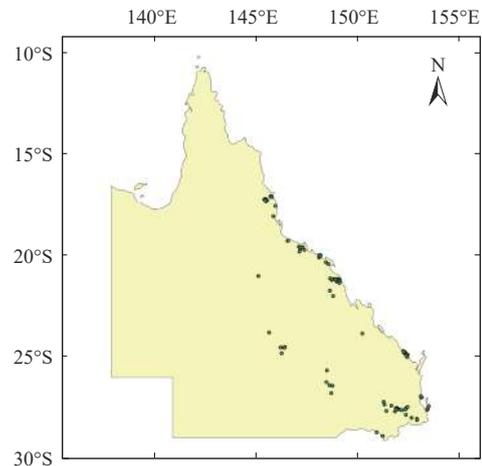


图 1 昆士兰州地下水监测井点位分布图

1.3 地下水储量计算

在短时间尺度内一般认为地球重力场变化主要是由于水的质量、地表生物量和冰雪质量的变化引起的, 但研究区域内地表生物量相对稳定, 所以在研究过程中忽略生物变化量的影响^[13]。根据 GRACE 月重力场模型反演得到的陆地水储量变化是包含地表径流、土壤水、雪水当量、冠层水和地下水变化等变化的总变化, 而地表径流和冠层水基本处于平衡状态, 变化可以忽略不计, 所以昆士兰地区的陆地水的总变化减去土壤水和雪水当量的变化可以得到地下水储量的变化, 其中土壤水和雪水当量可以由 GLDAS 获取。

$$\Delta G_{\text{GW}} = \Delta T_{\text{TWS}} - (\Delta S_{\text{SM}} + \Delta S_{\text{SWE}}). \quad (2)$$

式中: ΔG_{GW} 为地下水储量变化量; ΔT_{TWS} 为 GRACE 反演得到的陆地水水储量总变化量; ΔS_{SM} 和 ΔS_{SWE} 为由 GLDAS 水文模型得到的土壤水和雪水当量的变化。

2 结果与分析

2.1 水储量时间变化分析

图 2 为昆士兰州 2003—2015 年间陆地水、地表水以及地下水储量变化的时间序列图。对比图 2 中的 GRACE 和 GLDAS 时间序列可知, 11 a 间 GRACE 和 GLDAS 反演得出的时间序列具有明显的季节性和周期性变化, 且两者间变化趋势基本一致。两者时间序列间的相关系数高达 0.832, 其中每年的夏秋多表现为上升的趋势, 而冬季和春季多表现为下降的趋势。这是因为昆士兰州的夏秋两季比较湿润, 雨季为 1~3 月, 水资源得到有效的补充; 春季和冬季昆士兰州的降雨量较少, 且农作物需要大量灌溉, 导致水储量减少。

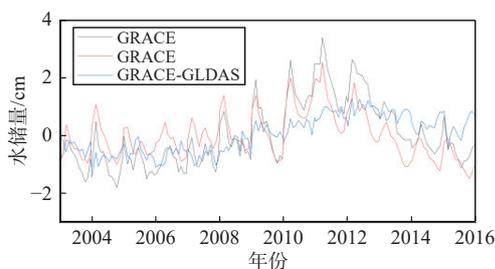


图 2 水储量变化时间序列

由图 2 可知, 2003—2006 年地下水储量缓慢下降, 2006—2007 年地下水储量缓慢上升, 2007—2013 年地下水储量明显上升, 2013—2016 年地下水储量又略微减少。利用线性拟合方法拟合昆士兰州地下水储量变化, 2003—2015 年昆士兰州的地下水储量整体变化速率为 1.3 ± 0.09 cm/a, 其中 2007-07—2012-11 地下水储量变化呈最快上升趋势, 有资料显示昆士兰州于 2007 年启动污水净化计划并宣布将循环水作为饮用水。地下水最大亏损出现在 2004 年 1 月, 为 -14.1 cm; 地下水最大盈余出现在 2012 年 2 月, 达到 12.8 cm。

2.2 水储量空间变化分析

图 3~5 为陆地水、地表水、地下水储量变化趋势的空间分布图, 三者空间分布基本一致。从图中可以发现陆地水储量的整体变化呈东增西减的趋势, 西北和西南亏损严重, 但整体呈上升趋势; 地表水的整体变化多呈现明显上升趋势; 而地下水储量变化趋势与陆地水储量变化趋势大致相同, 整体都呈现上升趋势, 且其在空间上也表现出东增西减的变化趋势。

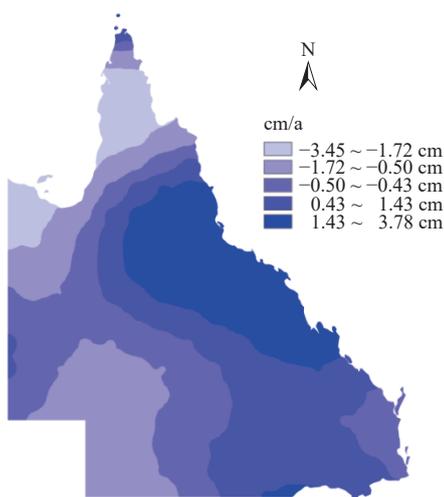


图 3 陆地水储量变化趋势

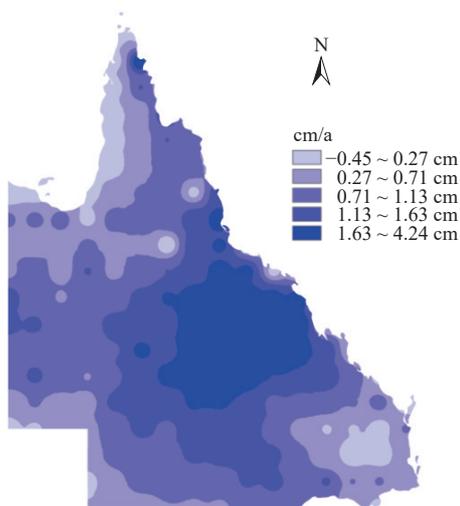


图 4 地表水储量变化趋势

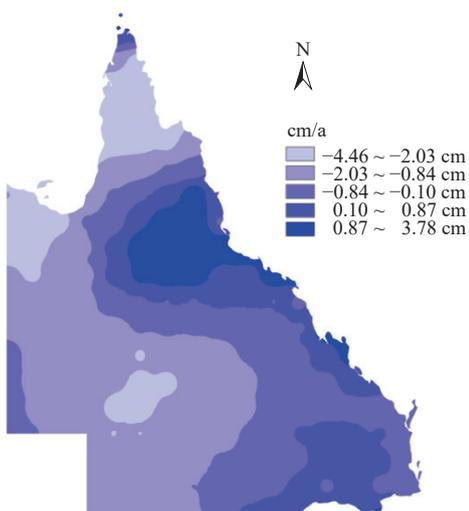


图 5 地下水储量变化

由图 5 可以看出,整个东部沿海地下水大多呈增长趋势,每年约以 $0.1\sim 3.78\text{ cm/a}$ 的速度增加;整个昆士兰州中西部地区的地下水大多呈现亏损状态,每年约以 $0.84\sim 0.2\text{ cm/a}$ 的速度减小;昆士兰中部和西北部地区的地下水消耗最为严重,约以 $2\sim 4\text{ cm/a}$ 的速度减小.地下水储量变化的差异可能与不同地区的降水情况、人类活动以及农作物种植情况等因素相关^[14].

3 验证与讨论

3.1 降雨数据对比

文中采用全球降水气候学项目提供的 GPCP 数据对昆士兰州 GRACE 反演的地下水进行对比分析.对 2003—2015 年间的 GPCP 数据进行处理得到 2003—2015 年年均降雨异常.图 6(a) 为 2003—2015 年昆士兰州地下水储量变化时间序列及同时间的月降雨数据,图中折线为反演得到的地下水储量变化时间序列,黑色柱状为对 GPCP 数据处理得到的昆士兰地区的月降雨数据.由图 6(a) 可以发现降雨量的最大值多出现在 1~3 月,而地下水的峰值相对降水具有 3~5 个月的延迟,这是由于降水下渗对地下水进行补给需要一定的时间.在每年的 12 月至次年 3 月降雨较多,对应的地下水呈上升状态;每年的 6~10 月降雨较少,地下水储量整体呈下降趋势;2003-06—

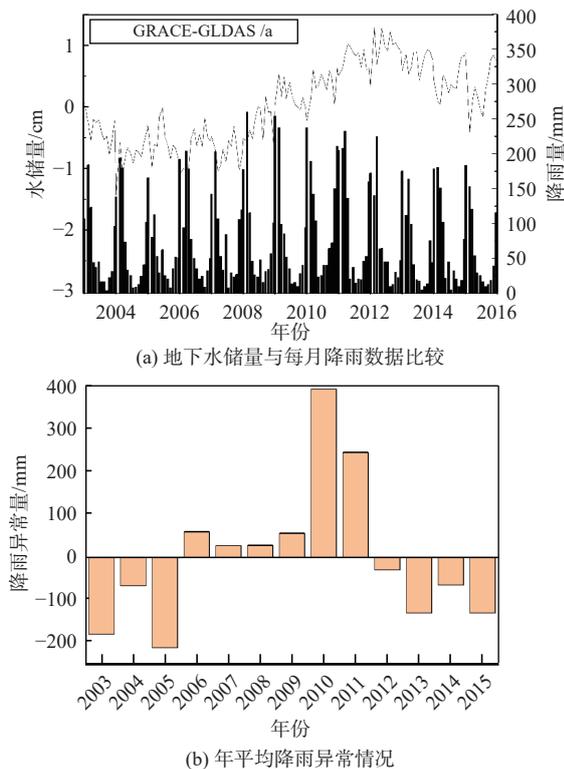


图 6 2003—2015 年间昆士兰州降雨数据

09 地下水出现骤降现象,在此期间降雨也急剧减少;2009 年的 1 月和 2 月由于降雨突然增多导致短时间内地下水发生快速上升的现象,已有资料显示 2009 年 2 月昆士兰州由于连续的强降雨,昆士兰州遭到洪水侵袭;同样在 2011 年的雨季,由于强降雨影响导致昆士兰州发生洪灾,同期的地下水储量呈快速上涨的趋势.图 6(b) 为 2003—2015 年年均降雨异常,由图 6(b) 可以发现 2003—2006 年、2012—2015 年年降水量低于年均值,与昆士兰州干旱较为吻合.2006—2012 年年降水偏多明显高于年均值,特别是 2010 年,昆士兰州年降雨异常值达到最大的 393 mm,地下水立马呈现快速上升的趋势;从 2006 年起降雨开始增多,地下水储量下降的趋势得到有效缓解;2007—2011 年地下水呈快速增长趋势,同期降雨也较常年偏多.由此可见,昆士兰州地下水储量变化趋势与该地区降雨量有较好的一致性,降雨是引起地下水变化的主要原因.

3.2 水井实测数据对比

昆士兰地区地下水位监测井位置分布如图 1 所示.对挑选出的 128 口地下水位监测井进行去平均处理得到 2003—2015 年昆士兰州地下水位变化的时间序列,对 GRACE 反演得到的地下水储量变化进行验证.若要将二者进行等效对比,需要将由监测井得到的地下水位乘以研究区域的给水度^[15],由于资料的缺失并未获得研究区域的相关资料,因此仅对二者的变化趋势进行分析.如图 7 所示,两者变化趋势基本一致,反演结果与地下水位数据间的相关系数高达 0.841.其中地下水位在 2003—2007 年呈下降趋势,2007—2011 年表现出明显的上升趋势,与 GRACE 反演结果相符合,验证了 GRACE 反演结果的正确性.

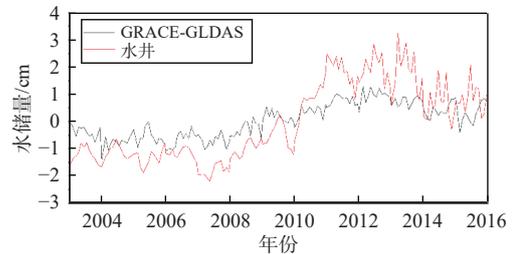


图 7 地下水储量变化与地下水位变化

4 结论

本文采用 2003—2015 年共 13 年的 GRACE 数据反演了昆士兰州的地下水储量变化,利用正向建模法恢复研究区域信号,并与 GPCP 降雨数据以及地下水水井实测数据进行综合比较分析,研究结论如下:

1) 时间上, 昆士兰州地下水在 2003—2015 年大约以 $1.3 \pm 0.09 \text{ cm/a}$ 的速率增加, 且地下水储量呈现出明显的季节性变化, 夏秋两季降雨增多地下水呈上升趋势, 冬季和春季降雨减少地下水则呈现下降趋势。

2) 空间上, 地下水储量呈现东增西减的显著空间差异, 其中昆士兰州东北部由于雨水充沛导致地下水上升速度最快, 以 3.78 cm/a 的速度增长; 中部和西北部地区的地下水消耗最为严重, 约以 $2 \sim 4 \text{ cm/a}$ 的速度减小。

3) 水井水位变化与反演得到的地下水储量变化趋势基本一致, 初步证明了反演结果的正确性。与 GPCP 降雨数据对比发现, 地下水储量变化与降雨密切相关, 且年地下水储量变化与降雨异常密切相关, 降雨是引起地下水变化的主要因素; 2007—2011 年降雨较常年偏多, 地下水呈快速增长趋势; 2012—2015 年降雨量较往年偏少, 因此, 2012—2015 年地下水储量呈下降趋势。

参考文献

- [1] CAZENAVE A, NEREM R S. Geophysics: redistributing earth's mass[J]. *Science*, 2002, 297(5582): 783-784. DOI: 10.1126/science.1074593
- [2] LANDERER F W, SWENSON S C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates[J]. *Water resources research*, 2012, 48(4): 4531. DOI: 10.1029/2011WR011453
- [3] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D, et al. Long-term groundwater storage change in Victoria, Australia from satellite gravity and in situ observations[J]. *Global and planetary change*, 2016, 139(5): 56-65. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.01.002
- [4] 周志才, 王卫平, 李冰瑶. 基于GRACE卫星时变重力场的淮河流域地下水储量变化规律研究[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(10): 37-41.
- [5] 谢小伟, 许才军, 龚正, 等. 利用GRACE反演陕甘晋高原地下水储量变化[J]. *测绘通报*, 2018(1): 133-137.
- [6] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D, et al. Low degree gravitational changes from GRACE: validation and interpretation[J]. *Geophysical research letters*, 2004, 31(22): L22607. DOI: 10.1029/2004GL021670
- [7] ZHANG Z Z, CHAO B F, CHEN J L, et al. Terrestrial water storage anomalies of Yangtze river basin droughts observed by GRACE and connections with ENSO[J]. *Global and planetary change*, 2015, 126(5): 35-45. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.01.002
- [8] SWENSON S, CHAMBERS D, WAHR J. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output[J]. *Journal of geophysical research atmospheres*, 2008, 113(8): B08410. DOI: 10.1029/2007JB005338
- [9] 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 atmospheres*, 1998, 103(B12): 30205-30230. DOI: 10.1029/98JB02844
- [10] SWENSON S, WAHR J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data[J]. *Geodesy and gravity tectonophysics*, 2006: L08402. DOI: 10.1029/2005gl025285
- [11] 姜永涛, 王丽美, 郭广猛, 等. GRACE时变重力数据后处理方法评价[J]. *测绘科学*, 2021, 46(3): 21-26.
- [12] 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.
- [13] 温志强, 黄征凯. 基于GRACE时变重力场模型研究印度河-恒河流域水储量变化[J]. *全球定位系统*, 2020, 45(5): 103-107.
- [14] 王微, 李伟伟, 王奉伟. 利用GRACE模型反演长江流域陆地水储量的变化[J]. *人民长江*, 2020, 51(10): 110-115, 149.
- [15] 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.

作者简介

俱晋 (1997—), 男, 硕士, 研究方向为卫星重力数据处理及应用研究。

魏长寿 (1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为卫星重力与水文学、GNSS。

滕雷 (1995—), 男, 硕士, 研究方向为大地测量数据处理。

Inversion of groundwater reserves changes in Queensland by GRACE

NAI Jin¹, WEI Changshou², TENG Lei¹, ZHAO Yueyao¹

(1. *College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*

2. *School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China*)

Abstract: Queensland is the second largest state in Australia. Monitoring and analysis of changes in groundwater reserves in this region this of great practical significance to the formulation of local ecological environment and water management policies, The time-varying gravity field model from gravity recovery and climate experiment (GRACE) issued by the University of texas center for space research (CSR) and the global land data assimilation system (GLDAS) surface assimilation model are used to monitor and analyze the temporal and spatial changes of groundwater reserves in Queensland, which are then verified and analyzed with measured well data and global precipitation climatology project (GPCP) rainfall data. The research results show that the groundwater increassd at a rate of 1.3 ± 0.09 cm/a in Queensland was approximately in 2003 to 2015. There is also a significant spatial difference between the east and the west. The comparison with the GPCP rainfall data shows that the rainfall is the main factor affecting the change of groundwater reserves, The comparison with the measured data of the water well reveals that the change trend of the underground inversion result is basically consistent with that of the water level of the well.

Keywords: gravity recovery and climate experiment (GRACE); time-varying gravity field; global land data assimilation (GLDAS); groundwater reserves; forward modeling method