

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.20180012

王洋, 魏加华, 解宏伟. 基于 GRACE 的柴达木盆地水储量变化[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 50-56. WANG Y, WEI J H, XIE H W. The variation of terrestrial water storage in the Qaidam Basin based on GRACE data[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 75-82. (in Chinese)

基于 GRACE 的柴达木盆地水储量变化

王洋^{1,3}, 魏加华^{1,2,3}, 解宏伟^{1,3}

(1. 青海大学 三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 3. 青海大学 水利电力学院, 西宁 810016)

摘要: 水储量是反映区域水资源变化和水量平衡的重要指标, 重力反演与气候实验 (GRACE) 卫星数据为大尺度的水储量变化评估提供了数据支撑。应用 2003–2015 年的 GRACE RL05 时变重力场数据并结合地面实测资料, 研究柴达木盆地的水储量时空变化特征及其归因。结果表明: 13 年间柴达木盆地水储量变化呈上升趋势, 月平均上升速度约 0.26 mm; 多年平均水储量变化幅度由南向北增量递减, 变化幅度 8.29~69.38 mm; 研究区水储量增加与降水量增多的趋势一致。基于 GRACE 时变重力场反演水储量的方法, 为西北资料稀缺地区的水储量变化评估提供了重要支撑。

关键词: GRACE; 柴达木盆地; 陆地水储量变化; 降水; 时空分布

中图分类号: TV 213; P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0075-08

The variation of terrestrial water storage in the Qaidam Basin based on GRACE data

WANG Yang^{1,3}, WEI Jiahua^{1,2,3}, XIE Hongwei^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China;
2. State Key Laboratory of Hydro Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;
3. School of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The terrestrial water storage (TWS) is an important indicator of regional water resources changes and water balance. The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) offers the data for research of variation in large scale TWS. In this paper, we used the data of GRACE RL05 and the in situ dataset to discover the spatial and temporal variation of TWS and its causes during 2003-2015 in the Qaidam Basin. The results showed that the variation of TWS showed an upward trend, with an ascending velocity of about 0.26 mm per month. The multi year average increment of TWS gradually declined from the south to the north, and it ranged between 8.29-69.38 mm. The rise of TWS was consistent with the ascending trend of precipitation in the study area. The method based on GRACE data to calculate TWS can provide an important support for the assessment of TWS variation in data scarce region in the northwest of China.

Key words: GRACE; Qaidam Basin; terrestrial water storage; precipitation; spatial and temporal variation

陆地水储量是陆地水变化中的一个重要参量, 综合反映了区域降雨、蒸散发、径流、地下水及人类

开发利用等相关活动, 是全球水循环地面观测极其重要的组成部分。区域/流域尺度陆地水储量及其

收稿日期: 2017-07-20 修回日期: 2017-09-18 网络出版时间: 2018-01-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180112.0912.002.html>

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0403600); 国家电网青海科技项目(52283014000T)

Funds: "13th Five Year" National Key Development Program (2017YFC0403600); Qinghai Science and Technology Project of National Power Grid(52283014000T)

作者简介: 王洋(1991-), 男, 江苏宿迁人, 主要从事卫星重力与水文学方面的研究。E-mail: wy2006cd@qq.com

通讯作者: 魏加华(1971-), 男, 陕西汉中, 研究员, 博士, 主要从事水资源调度管理、水利信息化方面的研究。E-mail: weijiahua@tsinghua.edu.cn

变化的研究,对理解和识别水资源状态、气候变化、农业生产、干旱等自然灾害中具有重要作用^[1]。

地球重力场变化通常是由地球各系统间的质量迁移和重新分布引起的^[2],通过精确观测地球重力场随时间的细微变化,可以从中反演地球水质量变化的情况。卫星重力技术为研究地球物质迁移和全球水问题提供了新的方法和视角。重力反演与气候实验(GRACE)卫星项目实施以来,国内外众多学者利用获取的时变重力场数据开展了陆地水变化^[3]、海平面变化^[4]、冰盖变化^[5]等研究。

Wahr 等^[6]利用模拟数据较早地研究了根据 GRACE 数据获取陆地水变化的基本理论和方法。Swenson 等^[7]利用 GRACE 数据研究了提取区域陆地水变化的方法。Chen 等^[8]和冯伟等^[9]利用 GRACE 卫星数据研究了亚马逊流域陆地水的变化特征。郑秋月等^[3]评述了 GRACE 重力卫星数据在估算区域水储量变化、地下水变化、陆地河流流域的水储量变化以及全球水储量变化等方面的相关研究和应用。国内利用 GRACE 卫星数据监测区域水储

量变化的应用主要有:青藏高原及其周边地区水储量变化的独立成分分析^[10];新疆天山中段南北坡水储量变化对比分析^[11];监测祁连山水储量时空变化^[12];监测长江流域水储量变化^[13];监测黄河中游地区水储量变化^[14]等。

柴达木盆地享有“聚宝盆”的美誉,随着柴达木循环经济试验区的建立,柴达木盆地综合资源开发与水资源利用中存在的供需矛盾问题日益凸显^[15]。较前人研究成果^[16],本研究利用 2003~2015 年间的 GRACE RL05 时变重力场数据并结合盆地内矿产开采数据、水资源利用数据以及相关水文气象数据,着重研究柴达木盆地的水储量时空变化特征及其归因。

1 研究区概况

柴达木盆地地处青藏高原东北部边缘,呈北西—南东方向延伸,东西长约 9 00 km,南北宽约 300 km,面积约 27.5 万 km²,南面、东北和西北分别被昆仑山、祁连山和阿尔金山所环绕,见图 1。

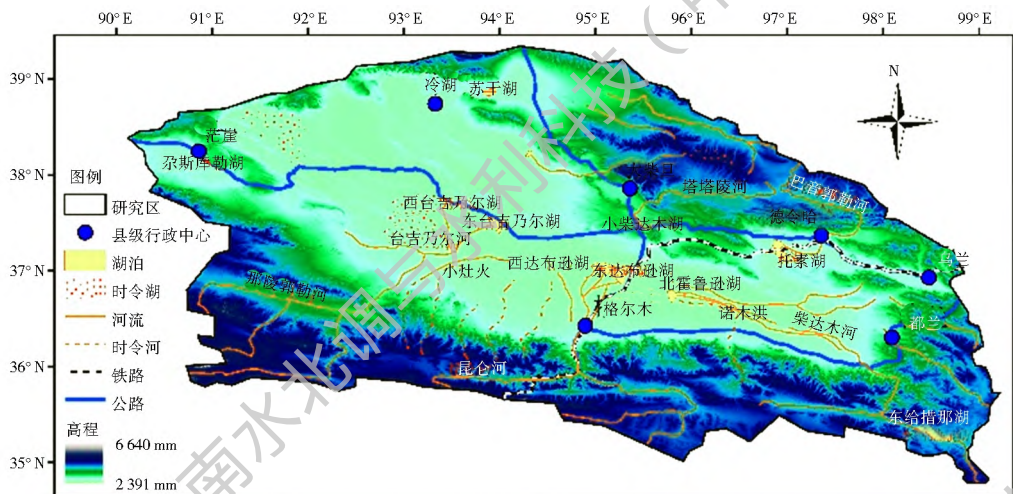


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

柴达木盆地属高原大陆性气候,地域辽阔、地形复杂多样。盆地四周为高寒山区,海拔在 3 500~6 860 m,空气干洁稀薄,太阳辐射较强,年平均气温 1.53 ℃。盆地中部为干旱荒漠区,海拔 2 676~3 200 m,降水稀少,气候干燥,植被覆盖率低,年平均气温为 4.77 ℃。盆地内年平均降水量为 16~190 mm,年蒸发量 1 974~3 183 mm。

盆地内共有 37 条常年性河流,均发源于四周山区,汇入盆地中心地带,形成尾间湖,径流主要来源于四周山区的冰雪融水和降水。盆地内约有盐湖 27 个,总面积约 1 500 km²。

柴达木盆地内蕴藏着丰富的石油、天然气、盐湖、煤炭、有色金属和石棉等资源,由于近些年盆地

内矿产资源开发规模的不断扩大,对区域重力场变化产生一定的影响,详见表 1。

2 计算原理与方法

重力反演与气候实验(GRACE)卫星,由美国国家航空航天局(NASA)和德国航空太空中心(DLR)合作研发,用于研究深层地球结构和跟踪地球表面质量变化,由两颗相距 220 km 的卫星组成,在同一极地轨道运行。2002 年 3 月发射。利用搭载的微波测距系统(MRS)和全球定位系统(GPS)等仪器精确测量两个飞行器之间的距离变化,通过重复地飞跃相同地区,GRACE 卫星便能够测量到地球重力场的微小变化^[17]。

表 1 柴达木盆地矿产资源开发利用情况
Tab. 1 Exploitation and utilization of mineral resources in the Qaidam Basin

年份	矿山企业数	固体矿/万 t	液体矿/万 t	气体矿/万 m ³
2003	178	1 883. 09		154 000
2004	159	2 515. 25		179 356
2005	162	3 014. 52		212 051
2006	208	3 532. 68		245 013
2007	241	5 690. 76		341 088
2008	250	4 287. 63	225. 03	436 507
2009	257	4988. 67	196. 05	430697
2010	251	5 300. 38	195. 57	561 017
2011	270	6 228. 85	204. 15	650 096
2012	262	6 307. 56	220. 62	601 488
2013	291	7 913. 31	220. 46	680 624
2014	266	7 447. 54	226. 06	688 900
2015	275	7 772. 04	229. 44	613 722

影响时变地球重力场的主要因素包括: 固体地球内部的质量变化、地表圈层的水循环、大气及海洋的质量变化等, 时变重力场信号因此能够连续反映地球各系统的物质分布与迁移过程^[2]。对于柴达木盆地而言, 去除人类活动以及大气和潮汐等质量变化的影响后, 剩余的信号便是陆地水储量(TWS)的变化^[18]。

当前, 应用解算过的 GRACE 卫星数据来反演全球以及区域的陆地水储量的变化, 国际上通行的做法^[19]是: 一种是应用已解算的月重力场模型数据直接求解; 另一种是利用卫星轨道数据推求区域陆地水储量变化, 即 Mascon 方法。本文利用 GRACE RL05 时变月重力场模型数据进行求解, 其数学公式可以表示为:

$$\Delta h(\theta, \varphi) = \frac{\alpha \rho_{\omega e}}{3 \rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l p_{lm}(\cos \theta) \frac{2l+1}{1+k_l} \cdot (\Delta C_{lm} \cos m \varphi + \Delta S_{lm} \sin m \varphi) \quad (1)$$

式中: $\Delta h(\theta, \varphi)$ 为等效水深, 陆地水总量变化为等效水深变化与区域面积的乘积; α 为地球平均半径; θ 为待定点的纬度; φ 为待定点的经度, 以东经为正; p_{lm} 为归一化的缔合勒让德函数多项式; ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 为无量纲的重力场球谐系数变化量, 其中 l, m 分别表示 C_{lm} 和 S_{lm} 的阶和次; $\rho_{\omega e}$ 为地球的平均密度; ρ_w 为水的密度; k_l 为一阶负荷 Love 数。

利用式(1), 通过 GRACE 卫星的重力场球谐系数的变化值来反演地球表层质量变化。由于 GRACE 卫星重力场球谐系数只会展开到有限的阶次, 因而利用这一公式计算地球表面的密度变化存在一定的截断误差, 且 GRACE 重力场系数的误差随 l 的增大而增大, 因此, 计算过程中相对高阶项的误差应予以考虑。为了降低相对高阶项误差对计算

结果造成的干扰, 引入高斯平滑核函数 $w(\alpha)$ 来计算表面区域平均变化, 即:

$$\Delta h(\theta, \varphi) = \frac{2\alpha \rho_{\omega e}}{3 \rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l p_{lm}(\cos \theta) \frac{2l+1}{1+k_l} \cdot w_l(\Delta C_{lm} \cos m \varphi + \Delta S_{lm} \sin m \varphi) \quad (2)$$

$$\text{其中 } w_l = \int_0^{\pi} w(\alpha) p_l(\cos \alpha) \sin \alpha d\alpha \quad (3)$$

$$p_l = p_{lm=0} / \sqrt{2l+1} \quad (4)$$

$$w(\alpha) = \frac{b \exp[-b(1-\cos \alpha)]}{2\pi (1-e^{-2b})}, \quad b = \frac{\ln(2)}{1-\cos(r/\alpha)} \quad (5)$$

不同阶数的 w_l 可通过以下关系递推获得:

$$w_0 = \frac{1}{2\pi}$$

$$w_{l+1} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right]$$

$$w_{l+1} = -\frac{2l+1}{b} w_{l+1} - w_{l-1} \quad (6)$$

3 相关数据获取与处理

3.1 GRACE 数据及处理

本文采用德国地学研究中心(GFZ)发布的 lev-er2 数据产品 RL05 版本, 时间跨度为 2003 年 1 月至 2015 年 12 月。

获取 GRACE 数据后, 对数据进行预处理、异常化处理、去相关处理和空间滤波处理^[20-21]等, 获得用于计算的标准数据, 处理流程及方法见图 2。

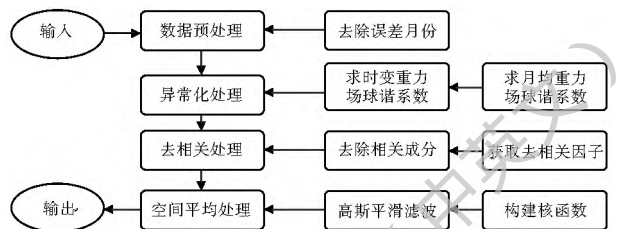


图 2 GRACE 数据处理流程
Fig. 2 The flow chart of GRACE data processing

3.2 人类活动数据及处理

柴达木盆地矿产资源开发利用数据来源于青海省统计局发布的 2003-2015 年海西州国民经济和社会发展统计公报, 本文以固体矿、液体矿和气体矿进行分类汇总, 从区域质量变化的角度修正对反演陆地水储量变化造成的干扰; 盆地内耗水量数据来源于青海省水利厅发布的 2003-2015 年青海省水资源公报, 统一换算以等效水深形式表示。

3.3 降水数据及处理

利用柴达木盆地内都兰、诺木洪、德令哈、大柴

且、格尔木、小灶火、冷湖、茫崖8个气象站2003–2015年的月降水量数据。采用反距离权重插值法(IDW)^[22]对各观测站点的降水数据进行空间插值,计算在空间上连续的表面数据,从而获取整个柴达木盆地的月平均降水量数据。

3.4 实际蒸散量计算

采用南京大学傅抱璞教授提出的方法^[23]计算柴达木盆地的实际蒸散量:

$$E = E_0 \{1 + P/E_0 - [1 + (P/E_0)^m]^{1/m}\} \quad (7)$$

式中: m 为反映下垫面透水性能、植被状况和地形坡度等因素的无量纲参数; E_0 为陆面蒸发能力,可根据蒸发器的实测值通过折算系数获取,换算成大水

体蒸发值近似代表蒸发能力; P 为降水量。

4 结果与分析

4.1 水储量年内及年际变化

4.1.1 多年水储量变化与降水变化过程

图3为2003–2015年基于GRACE反演的柴达木盆地水储量变化和降水量变化过程图。从图中可以看出,2003–2015年柴达木盆地的水储量变化整体呈上升趋势,月平均上升速度约0.26 mm,总增加量40.01 mm。水储量随季节变化呈现出周期性变化特点,水储量最大值出现在2012年8月,达到47.36 mm,水储量最小值出现在2004年6月,为-48.60 mm。

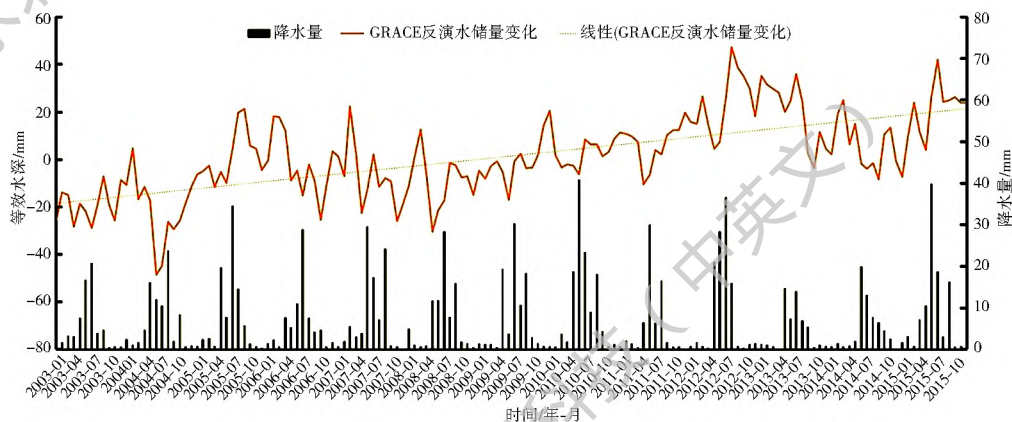


图3 2003–2015年水储量变化与降水量变化过程

Fig. 3 Inter monthly variation of terrestrial water storage and precipitation from 2003 to 2015

水储量变化过程与降水量变化过程的趋势基本一致。总体来说,降水量多的年份,水储量处于较高的水平,降水量少的年份,水储量明显下降;降水量较多的月份,该时段内水储量会有明显的上升。但水储量变化的峰值一般滞后于降水量峰值一个月时间左右,这可能是土壤截留、湖泊及地下水的调蓄作用所致^[1]。

4.1.2 水储量季节性变化

按照季节(3月–5月为春季,6月–8月为夏季,9月–11月为秋季,12月–2月为冬季)对月尺度数据进行统计,获得柴达木盆地水储量变化的季节值,结果见图4。总体上,柴达木盆地的水储量呈现出较为明显的季节性变化:冬季盆地水储量达到全年最高,夏季降至最低水平。

柴达木盆地构造封闭,可视作相对独立的水文系统。对于此类盆地来说,降水为主要的补给方式,蒸散发是主要的排泄方式。陆地水储量的增减与降水量的大小有一定的相关性,但同时与盆地的实际蒸散量密不可分。盆地内分布较为广泛的季节性冻土^[24],在夏季冻土融化,土壤活跃层变厚,使得柴达

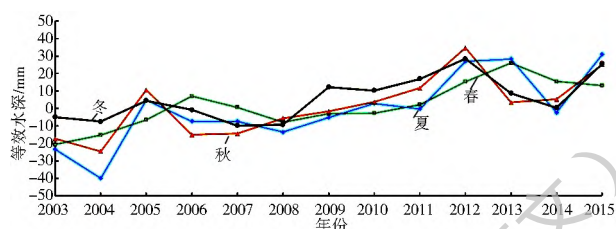


图4 2003–2015年季节性水储量变化过程

Fig. 4 Seasonal variation of terrestrial water storage from 2003 to 2015

木盆地的蒸发同样多集中在夏季时节,陆地水储量随着蒸发的加剧而减少;冬季土壤冻结,陆地水则保留在冻土层中,致使柴达木盆地冬季水储量达到极值。

4.2 水储量空间变化及降水空间分布

图5为柴达木盆地多年平均水储量变化的空间分布;图6为多年平均降水空间分布。从图5中可以看出,2003–2015年,柴达木盆地各区域的水储量均有不同程度的上升。水储量变幅空间差异较大,盆地南部的的水储量增加较多,而西北部的阿尔金山、祁连山区增长较低,多年平均水储量变化幅度由南向北增量递减。

同期的多年平均降水量空间分布(图6)显示,

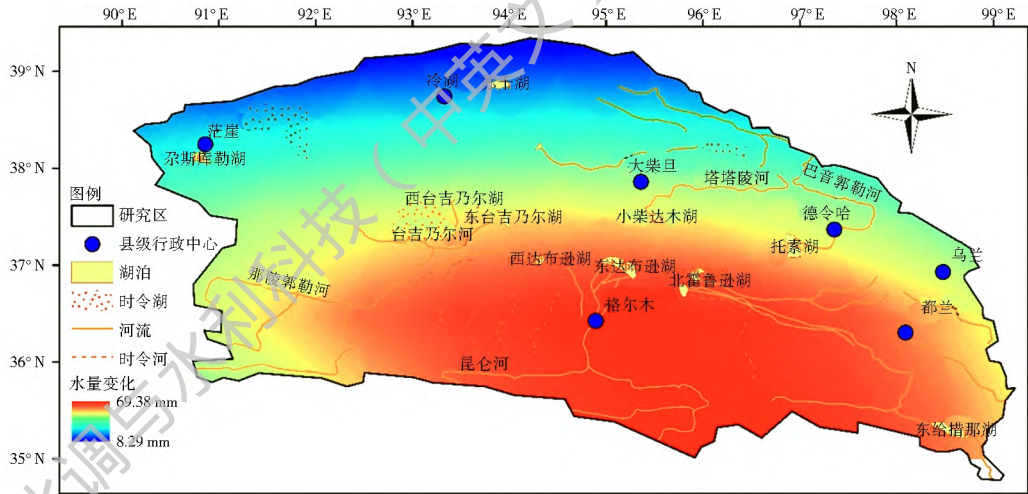


图 5 2003- 2015 年平均水储量变化

Fig. 5 Spatial variation of multi-year average terrestrial water storage during the period of 2003- 2015

降水分布的空间差异较大, 东部区域降水较多, 降水从东向西呈递减状态。地区内年降水量最大值

250.83 mm, 位于盆地东部德令哈、都兰一带, 在西北部茫崖、冷湖一带, 降水量仅19.53 mm。

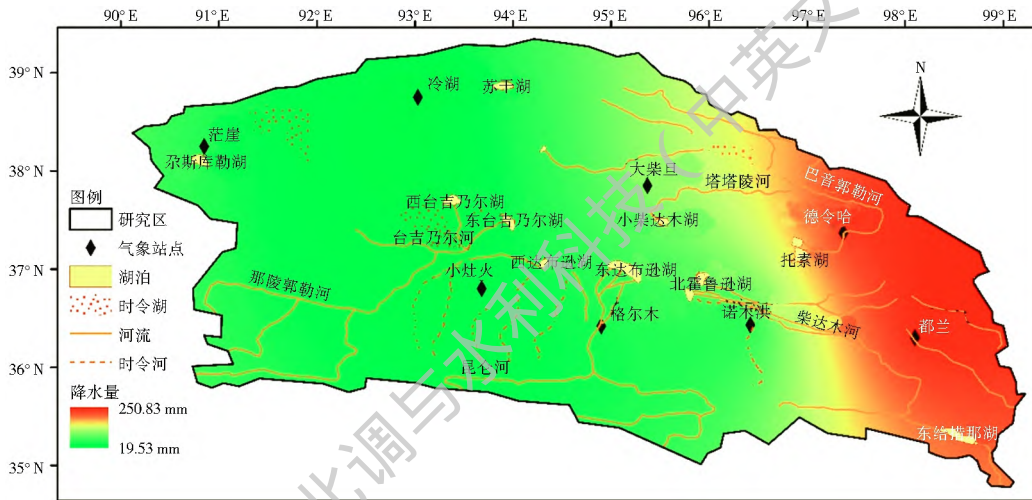


图 6 2003- 2015 年平均降水量

Fig. 6 Multi-year average precipitation during the period of 2003- 2015

对比图 5 和图 6 可以看出, 年均降水空间分布和陆地水储量变化的分布趋势并不一致。水储量变化最大值(69.38 mm)出现在格尔木周边区域, 该区域是那陵格勒河、格尔木河、香日德河等较大径流量河流的汇入地; 处于昆仑山以北的山前冲积平原上, 地形平坦, 植被覆盖较多, 虽然降水量相对较少, 但水源涵养能力较强, 有利于水资源的储存。水储量变化最小值(8.29 mm)出现在冷湖以北的阿尔金山区, 该区域位于阿尔金山脉东部, 降水量极少, 气候干旱, 植被贫乏, 水源涵养能力极弱。这表明降水并非影响陆地水储量的唯一因素, 陆地水储量的变化还受到补排条件、地形地势、地貌特征、植被覆盖度等因素的影响^[25]。

西南部山区的那陵郭勒河流域, 最大值为 42.15 mm。冷湖以北的阿尔金山区为水储量最小地区, 为 6.83 mm, 见图 7。

由图 5、图 7 可以得知, 2003- 2015 年柴达木盆地水储量在空间变化上主要受到盆地西南部以及南部中心区域的水量变化控制, 水储量的增加呈现出自南向北、自西南向西北的走向。

4.3 结果验证与归因分析

4.3.1 基于水量均衡原理的结果校验

根据水量均衡原理, 可知:

$$\Delta S = I - O \quad (8)$$

式中: ΔS 为区域水储量的变化; I 为区域总补给量; O 为区域总排泄量。

由于内陆盆地较为封闭构造特征, 从补给、排泄

2003- 2015 年间, 其中 2012 年柴达木盆地的水储量处于历年最高状态, 水量增长中心位于盆地

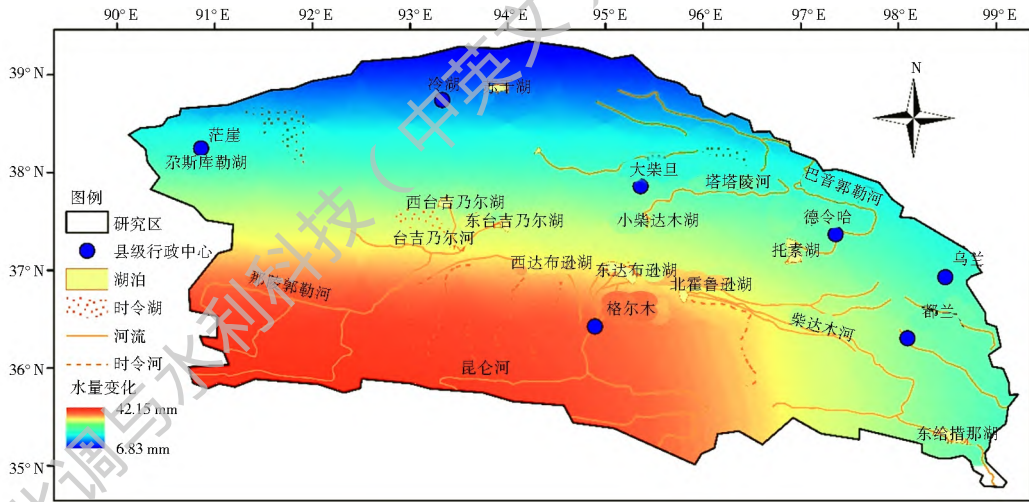


图 7 2012 年水储量变化

Fig. 7 Spatial variation of terrestrial water storage in 2012

角度进行分析验证,并考虑到盆地内生产生活所耗水量。因此,上式可改写为:

$$\Delta S = P - E - C \quad (9)$$

式中: P 为降水量; E 为实际蒸散量; C 为耗水量。

本文将得到的降水量、实际蒸散量与耗水量数据进行叠加计算,同时将水储量变化转换为相对上年的变化量,然后将 GRACE 反演计算结果与辅助数据的校验结果进行对比分析,见图 8。



图 8 GRACE 数据计算结果与校验结果对比

Fig. 8 Comparison diagram of the results of GRACE data and authentication data

从图 8 可以看出,基于 GRACE 得到的结果与校验结果的波动趋势大体一致,二者之间的线性相关系数达到 0.83,相关性较高。利用 GRACE 数据反演得到水储量变化的波动幅度稍大于校验结果,但是二者的变化幅度仍在同一数量级上;在个别年份二者之间还存在着峰谷错位的现象。

表 2 为各年的降水量、实际蒸散量与耗水量。从表 2 可知,13 年间柴达木盆地累计降水量 1620.51 mm,累计蒸散量 1557.01 mm,累积耗水量 30.27 mm,补给排泄差 33.28 mm。基于 GRACE 数据计算得到的水储量增量为 40.01 mm,与补给排泄差存在约 7 mm 差值。

导致相关误差的原因可能是:校验数据与 GRACE 数据采样频率及采集方式的差别;蒸散发与降水的时序关系及自身的不确定性;辅助数据与

GRACE 数据的空间分辨率的差异^[16]。

表 2 降水量、实际蒸散量和耗水量统计

Tab. 2 Statistical table of precipitation, actual evapotranspiration and water consumption

mm				
年份	降水量	实际蒸散量	耗水量	变化量
2003	100.80	81.25	1.78	17.77
2004	118.94	105.08	1.83	12.04
2005	129.30	110.25	1.79	17.26
2006	119.51	122.85	1.85	-5.19
2007	123.12	130.60	1.73	-9.21
2008	119.23	123.31	2.54	-6.62
2009	133.10	130.11	2.26	0.74
2010	174.42	158.24	3.18	13.00
2011	122.36	120.11	3.34	-1.09
2012	149.63	128.29	2.64	18.70
2013	99.47	105.51	2.63	-8.67
2014	100.99	118.49	2.30	-19.80
2015	129.68	122.93	2.40	4.35
总计	1620.55	1557.01	30.27	33.28

4.3.2 水储量变化归因分析

由于降水是柴达木盆地水量补给最主要的来源,蒸散发及消耗用水是主要的排泄方式,本文将获取的补给量和排泄量与利用 GRACE 数据反演得到的陆地水储量变化量进行相关分析。水储量的变化与降水量之间存在着较大的相关性,二者之间的相关系数为 0.63;而水储量的变化与实际蒸散量和盆地内耗水量相关性较低。这说明逐渐增多的降水是导致柴达木盆地水储量增加的重要影响因素。

基于 GRACE 时变重力场反演区域水储量的方法,为西北资料稀缺地区的水储量变化评估提供了

重要支撑。需要注意的是,在人类活动较强的地区,区域时变重力场也受到一定的影响。2003-2015 年柴达木盆地内年产矿石量(固体和液体矿,忽略气体矿影响)在 1 883.09~8 001.48 万 t 之间(表 1),并呈现出逐年递增的趋势,因此对柴达木盆地区域质量变化的影响幅度为 2.11%~9.32%,反演计算水储量变化时需将该部分干扰考虑在内。

5 结论

根据 2003-2015 年 GRACE 月平均重力场数据和相关辅助数据,对柴达木盆地水储量时空变化、演变趋势及其与降水间的相关性进行分析,主要得出以下结论。

(1) 2003-2015 年柴达木盆地的水储量变化呈现整体上升的趋势,月平均上升速度约 0.26 mm,累计上升量 40.01 mm;随着季节变化呈现出周期性变化的特点,水储量最大值出现在 2012 年 8 月,达到 47.36 mm。水储量最小值出现在 2004 年 6 月,为 -48.60 mm。水储量变化过程与降水量变化过程的趋势基本一致,但水储量变化的峰值一般滞后于降水峰值一个月时间左右。

(2) 水储量变化与降水量变化存在季节性变化的规律。柴达木盆地水储量冬季达到全年最高,夏季降至最低水平。陆地水储量的增减与降水量的多少有较大的相关性,但同时与盆地的实际蒸散量和耗水量密不可分。

(3) 2003-2015 年,柴达木盆地的水储量变幅在 8.29~69.38 mm,空间差异较大,盆地南部的的水储量增加明显,而西北部的阿尔金山、祁连山区增长幅度较小,总体呈由北向南阶梯状递增。降水空间差异较大,东部区域降水较多,大体上呈现从东向西逐渐递减状态。除降水外,陆地水储量变化还受补排条件、地形地势、地貌特征、植被覆盖度等因素的影响。

(4) 柴达木盆地地域辽阔、地形复杂,使用常规的监测手段无法完成全区域覆盖、连续不断的有效监测。然而由于 GRACE 卫星数据的空间分辨率较低,数据覆盖时段较短等原因又限制着 GRACE 卫星数据的应用。相信随着监测时间的延续,监测手段的进一步提升,特别是 GRACE Follow-on 后续计划的实施,获取更高精度和更高分辨率的重力场数据后,可以更加精确地观测陆地水储量变化,这将在水资源开发管理、气候变化监测、模型数据同化等领域发挥着重要地作用。

参考文献(References):

- [1] 许朋琨,张万昌. GRACE 反演近年青藏高原及雅鲁藏布江流域陆地水储量变化[J]. 水资源与水工程学报, 2013(1): 23-29. (XU P K, ZHANG W C. Inversion of terrestrial water storage changes in recent years for Qinghai Tibetan plateau and Yarlung Zangbo River basin by GRACE[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013(1): 23-29. (in Chinese))
- [2] 卢飞. 基于 GRACE RL05 数据的近十年全球质量变化分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. (LU F. Global mass change analysis in recent ten years by GRACE RL05 data[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [3] 郑秋月,陈石. 应用 GRACE 卫星重力数据计算陆地水变化的相关进展评述[J]. 地球物理学进展, 2015(6): 2603-2615. (ZHENG Q Y, CHEN S. Review on the recent developments of terrestrial water storage variations using GRACE satellite based datum[J]. Progress in Geophysics, 2015(6): 2603-2615. (in Chinese)) DOI: 10.6038/pg20150619.
- [4] 冯伟,钟敏,许厚泽. 联合卫星测高、卫星重力和海洋浮标资料研究 2005-2013 年的全球海平面变化[J]. 地球物理学进展, 2014(2): 471-477. (FENG W, ZHONG M, XU H Z. Global sea level changes estimated from satellite altimetry, satellite gravimetry and Argo data during 2005-2013[J]. Progress in Geophysics, 2014(2): 471-477. (in Chinese)) DOI: 10.6038/pg20140201.
- [5] CHEN J L, WILSON C R, BLANKENSHIP D, et al. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(12): 859-862. DOI: 10.1038/ngeo694.
- [6] WHAR 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.
- [7] SWENSON S, WAHR J. Methods for inferring regional surface mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Measurements of time variable gravity[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B9): 2193.
- [8] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D. The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE[J]. Water Resources Research, 2010, 46(12). DOI: 10.1029/2010WR009383.
- [9] 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(3): 814-821. (FENG W, JEAN-MICHEL L, ZHONG M, et al. Terrestrial water storage changes in the Amazon basin measured by GRACE during 2002-2010[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012(3): 814-821. (in Chinese)) DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.011.
- [10] 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. (WEN H J, HUANG Z E, WANG Y L, 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. (in Chinese) DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016. 20140447.
- [11] 孙桂燕, 郭玲鹏, 常存, 等. 新疆天山中段南北坡水储量变化对比分析[J]. *干旱区地理*, 2016(2): 254-264. (SUN G Y, GUO L P, CHANG C, et al. Contrast and analysis of water storage changes in the north slopes and south slopes of the central Tianshan Mountains in Xinjiang[J]. *ARID Land Geography*, 2016(2): 254-264. (in Chinese) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x. 2016. 02. 004.
- [12] 许民, 张世强, 王建, 等. 利用 GRACE 重力卫星监测祁连山水储量时空变化[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 458-467. (XU M, ZHANG S Q, WANG J, et al. Temporal and spatial patterns of water storage change of Qilian Mountains in recent 8 years based on GRACE[J]. *ARID Land Geography*, 2014, 37(3): 458-467. (in Chinese) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x. 2014. 03. 006.
- [13] 超能芳, 王正涛, 晁定波, 等. 利用 GRACE RL05 模型监测长江流域水储量变化[J]. *测绘科学*, 2014, 39(6): 40-43. (CHAO N F, WANG Z T, CHAO D B, et al. Monitoring water storage change of Yangtze River basin from GRACE RL05 model[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(6): 40-43. (in Chinese) DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307. 2014. 06. 001.
- [14] 李爱华, 崔胜玉, 王红瑞, 等. 基于 GRACE 卫星时变重力场模型的黄河中游地区水储量变化研究[J]. *自然资源学报*, 2017(3): 461-473. (LI A H, CUI S Y, WANG H R, et al. Water storage changes in the middle reaches of the Yellow River Basin based on GRACE time variable gravitation model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017(3): 461-473. (in Chinese) DOI: 10.11849/zrzyxb. 20160233.
- [15] 杨荣金, 舒俭民, 李秀红, 等. 柴达木盆地生态环境保护战略与对策[J]. *科技导报*, 2017, 35(6): 115-119. (YANG R J, SHU J M, LI X H, et al. Strategy and countermeasures of ecological environment protection in Qaidam Basin[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(6): 115-119. (in Chinese) DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857. 2017. 06. 015.
- [16] 苏子校. 利用 GRACE 卫星数据估算柴达木盆地水储量变化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. (SU Z X, Estimating water storage variations in Qaidam Basin using GRACE data[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015 (in Chinese))
- [17] 严家宝, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. 近十年中国陆地水储量变化及其时空分布规律[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(4): 21-28. (YAN J B, JIA S F, LYU A F, et al. Spatial temporal variation characteristics of China terrestrial water storage in the last ten years[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(4): 21-28. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq. 2016. 04. 004.
- [18] BETTADPUR S. Level 2 gravity field product user handbook [J]. *The GRACE Project* (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 2003), 2007.
- [19] 钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中长空间尺度的变化趋势[J]. *科学通报*, 2009(9): 1290-1294. (ZHONG M, DUAN J B, XU H Z, et al. Trend of China land water storage redistribution at medr and large spatial scales in recent five years by satellite gravity observations[J]. *Chinese Sci Bull*, 2009(9): 1290-1294. (in Chinese) DOI: 10.1007/s11434-008-0556-2.
- [20] 曹艳萍, 南卓铜, 胡兴林. 利用 GRACE 重力卫星数据反演黑河流域地下水变化[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 680-689. (CAO Y P, NAN Z T, HU X L. Changes of groundwater storage in the Heihe River Basin derived from GRACE gravity satellite data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 680-689. (in Chinese))
- [21] 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(7): 1021-1026. (LI W D, GUO J Y, CHANG X T, 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(7): 1021-1026. (in Chinese) DOI: 10.13203/j.whugis.20150079.
- [22] 刘琰琰. 气象要素插值的空间化精度提高方法研究[J]. *气象科学*, 2017, 37(2): 278-282. (LIU Y Y. Analysis of spatial interpolation methods for meteorological elements anomaly[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2017, 37(2): 278-282. (in Chinese) DOI: 10.3969/2016jms. 0021.
- [23] 姚俊强. 干旱内陆河流域水资源供需平衡与管理[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015. (YAO J Q. Analysis and management of water balance between supply and demand in the inland arid river basin[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2015. (in Chinese))
- [24] 高荣, 董文杰, 韦志刚. 青藏高原季节性冻土的时空分布特征[J]. *冰川冻土*, 2008(5): 740-744. (GAO R, DONG W J, WEI Z G. The features of temporal and spatial distributions of seasonal frozen soil in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008(5): 740-744. (in Chinese))
- [25] 廖梦思, 章新平, 黄煌, 等. 利用 GRACE 卫星监测近 10 年洞庭湖流域水储量变化[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(1): 61-68. (LIAO M S, ZHANG X P, HUANG H, et al. Monitoring water storage changes in Dongting lake basin from GRACE gravity satellite[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(1): 61-68. (in Chinese) DOI: 10.6038/pg20160107.