

利用 GRACE 重力卫星监测黑河流域水储量变化

曹艳萍, 南卓铜

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:利用 CSR 数据中心公布的 GRACE 重力测量卫星最新数据 RL04, 经去相关和 Fan 滤波处理去除误差, 提高结果精度, 最终反演得到黑河流域 2002~2008 年水储量变化趋势, 并对其进行时序特征和空间分布特征分析。结果表明: 黑河流域水储量有明显的季节变化, 水储量增加的最大幅度出现在夏季, 减少的最大幅度出现在冬季; 总体上水储量呈逐年上升趋势, 水储量极值与降水极值具有较明显的一致性; 水储量在空间上的分布受流域地形影响显著, 上、中游水储量呈增加趋势, 下游水储量部分地区减少, 部分地区增加。

关 键 词: GRACE; 水储量变化; 降水; 黑河流域

中图分类号: P 332; TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)06-0719-09

引 用 格 式: Cao Yanping, Nan Zhuotong. Monitoring Water Storage Variations in the Heihe River Basin by the GRACE Gravity Satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 719-727. [曹艳萍, 南卓铜. 利用 GRACE 重力卫星监测黑河流域水储量变化[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 719-727.]

1 引 言

2002 年 3 月发射的重力反演与气候实验卫星 (GRACE) 是全球第二颗重力测量卫星。它为研究深层地球结构和跟踪地球表面质量变化提供了新手段, 同时也为反演陆地水储量变化提供了新方法^[1]。精确测量的水储量变化包括水循环过程中降雨、蒸发、地表径流、土壤水与地下水的交换等各部分变化的总和, 因此它不但可为水文模型提供数据, 也可验证模型输出结果的精度; 此外, 测量水储量的变化还有助于对于旱洪涝等灾害进行监测及评估^[2-3]。

在 GRACE 重力卫星发射之前, 由于缺乏实测数据以及传统测量方法成本太高, 很难获取高精度的全球或局部水储量变化信息, 而 GRACE 重力卫星的发射使其成为可能。研究表明, 利用 GRACE 卫星数据可以有效监测到流域水储量季节变化趋势, 并证明该方法是切实有效的^[4-5]。曹艳萍等^[6]对 GRACE 重力测量卫星在水文领域的应用进行了概括综述, 并总结了国内外 GRACE 反演流域水储量

的应用成果, 研究显示国外流域的应用主要集中在 Amazon-Orinoco 和 Mississippi-Ohio 等大尺度流域。Chen 等^[7]利用 GRACE 重力卫星监测到亚马逊流域 2005 年水储量显著减少, 与当年该流域发生干旱事件相吻合。Winsemius 等^[8]利用 GRACE 重力卫星数据获取了赞比西河流域上游水储量变化的时变信号, 并用集成单元流域模型 LEM 验证 GRACE 得到流域水储量变化趋势, 结果显示两种方法所得的变化趋势较为一致。国内 GRACE 卫星在监测流域水储量的应用主要有: 监测长江流域水储量的周年变化^[2]; 监测海河流域水储量的月、季及年度水储量变化^[9]; 监测三峡水库的水储量变化^[10]等。与国外相比, 国内对 GRACE 应用的研究在深度和广度上都比较欠缺。

本文利用 GRACE 重力卫星反演黑河流域 2002~2008 年的水储量变化, 以此分析水储量变化的时空特征。由于该流域生态环境脆弱, 水资源短缺导致生态环境恶化, 严重制约着流域经济的发展^[11], 利用 GRACE 重力卫星反演的流域水储量变

收稿日期: 2011-07-25; 修订日期: 2011-10-17

基金项目: 国家 863 计划项目 (2008AA12Z205), 中国科学院重要方向项目 (KZCX2-YW-Q10-1), 国家 973 计划项目“北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响与适应对策” (2010CB951403) 资助。

作者简介: 曹艳萍 (1986—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事 GRACE 重力卫星的应用研究。E-mail: 0310cyp@163.com。

通讯作者: 南卓铜 (1977—), 男, 浙江乐清人, 研究员, 主要从事地理信息系统应用、水文建模、数据中心共享等方面的研究。

E-mail: nztong@lzb.ac.cn.

化为水资源决策部门提供理论依据。

2 研究区概况

黑河流域是我国西北典型的内陆河流域,位于欧亚大陆中部,远离海洋,周围高山环绕,主要受中部高纬度的西风带环流控制和极地冷气团影响,气候干旱少雨,生态环境脆弱,水资源短缺,属于典型的资源型缺水地区。本研究采用黑河流域新边界(图 1),该流域总面积约为 $27.1\times 10^4\text{ km}^2$,以莺落峡和正义峡分别为上、中、下游的分界点。上游主要为青藏高原北部边缘的祁连山地,有冰川分布,年降水量 350 mm 以上,多年平均气温低于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,是黑河流域的产流区

和水源地。中游地处河西走廊,海拔多为 $1\,400\sim 1\,700\text{ m}$ 之间,多年平均降水量 140 mm ,潜在蒸发量为 $1\,410\text{ mm}$,多年平均温度为 $6\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。整个黑河流域 90%的耕地集中在中游河西走廊地区,该地区是黑河流域的耗水区和径流消散区。下游属于阿拉善高原和额济纳旗盆地,除河流两岸和居延三角洲绿洲外,大部分为荒漠、沙漠和戈壁,多年平均降水量只有 47 mm ,而潜在蒸发量在 $2\,500\text{ mm}$ 以上,多年平均气温为 $8\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,属于极度干旱区,具有显著的降水少、蒸发量大、温差大、风大沙多和日照时间长等特点,为径流消散区^[12-13]。整个流域的常年性河流主要集中在上游和中游,局部分布一些季节性河流和湖泊。

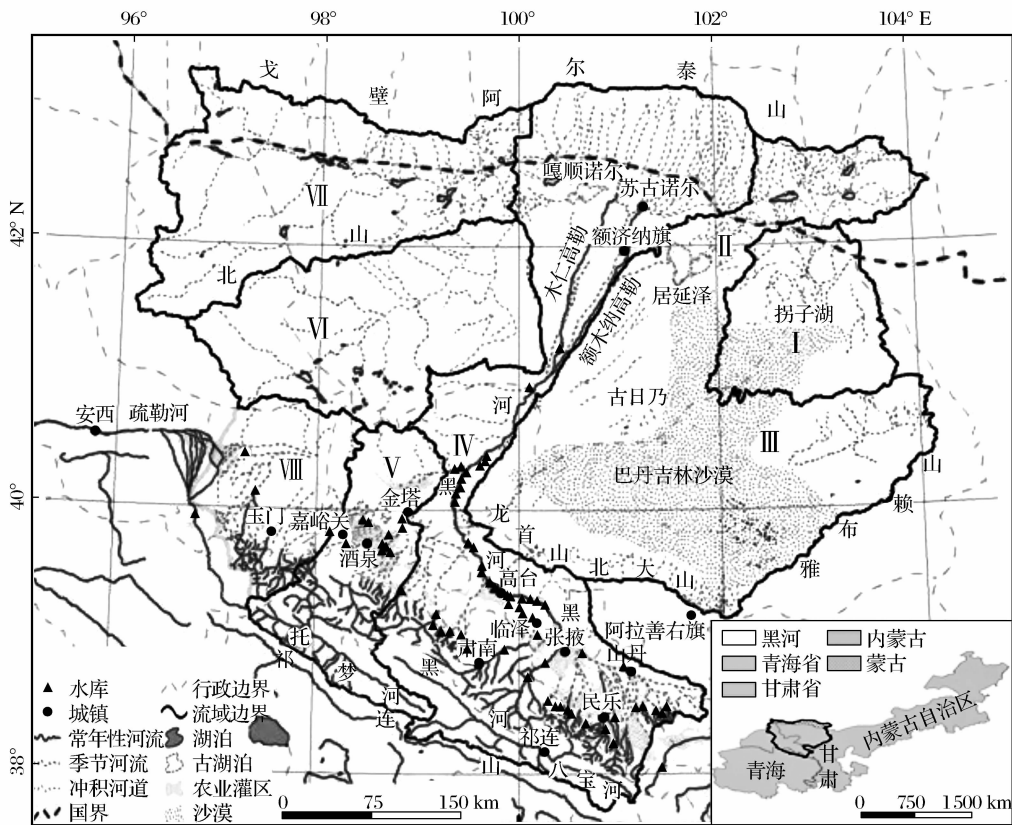


图 1 黑河流域水系分布及位置图^①

Fig. 1 The river system and location map of the Heihe river basin

3 计算原理

GRACE 重力卫星可以较精确地监测地球重力场的变化,而重力变化反映了地球质量的重新分布。对于陆地部分,陆地水质量的变化是引起重力场时

变的主要原因^[14]。根据 GRACE 重力卫星提供的球谐系数,求出地表质量变化,进而转换为流域水储量变化。

由重力场模型球谐系数表示地球表面质量变化量的模型^[16]为:

$$\Delta\sigma(\theta,\phi) = \frac{a\rho_{\text{ave}}}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} (\Delta C_{lm} \cos(m\phi) + \Delta S_{lm} \sin(m\phi)) \tag{1}$$

① 吴立宗等,基于遥感与 GIS 的黑河流域汇水区范围分析,2011,1-8。

其中: a 为地球半径(6 378 136.3 m), ρ_{ave} 为地球的平均密度(5 517 kg/m³), θ 和 ϕ 分别为地球的余纬度和东经, ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} 为相应的大地水准面球谐系数变化量,为无量纲数值,由获取的 GRACE 数据计算得到; \tilde{P}_{lm} 为归一化 Legendre 缔合函数, K_1 为负载 Love 系数。

GRACE 重力卫星数据具有测量误差,测量误差随重力场球谐系数的阶数 l 的增加而扩大。而由 GRACE 重力卫星反演得到的描述地球重力场的球谐系数,在实际应用中不是展开到无穷大,而是截取到一定的阶数。利用式(1)计算地球表面质量变化时不可避免地会存在一定的截断误差。为了减少高阶项误差对结果造成的影响,在式(1)中引入 Jekeili^[15] 构造的高斯平滑核函数 $W(\alpha)$ ^[16],得到更精确的反演地球表面质量变化的公式为:

$$\overline{\Delta\sigma}(\theta,\phi)=\frac{2a\rho_{ave}\pi}{3}\sum_{l,m}\frac{2l+1}{1+k_l}W_l\tilde{P}_{lm}(\cos\theta)\cdot$$
$$[\Delta C_{lm}\cos(m\phi)+\Delta S_{lm}\sin(m\phi)]\quad (2)$$

其中: W_l 值通过迭代法求得,具体如下:

$$W_0=\frac{1}{2\pi}\quad (3)$$

$$W_1=\frac{1}{2\pi}\left[\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}}-\frac{1}{b}\right]\quad (4)$$

$$W_{l+1}=-\frac{2l+1}{b}\cdot W_l+W_{l-1}\quad (5)$$

$\Delta\sigma/\rho_w$ 是用等效水高表示的物质质量变化(单位为 mm),即流域水储量变化,其中 $\rho_w=1\,000\text{ kg/m}^3$ 。

4 数据处理

4.1 GRACE 数据

最新可用的 GRACE 数据主要由美国德克萨斯大学空间研究中心(CSR)、德国地学研究中心(GFZ)及美国喷气推进实验室(JPL)公布的 Level-2 数据,包括全球无量纲月球谐系数,最高已达到 120 阶。本文采用的是由 CSR 数据中心提供的第 4 发行版本(RL04)数据,时间段为 2002 年 8 月~2008 年 12 月,不包括 2003 年 1 月和 6 月,2004 年 1、7 月及 8 月此 5 个月的数据。其中 2003 年 6 月数据是 GRACE 卫星缺失的;反演 2003 年 1 月和 2004 年 1 月的重力场球谐系数时天数不足一个月,可能导致此两月数据精确度降低;2004 年 7 月和 8 月,由于卫星轨道轨迹空间覆盖范围差导致数据精度低^[17]。在实际应用中去除了这些月份的球谐系数,以期获取更精确的水储量变化结果。

GRACE 数据的空间分辨率与球谐函数展开的

阶数大小息息相关。阶数 l 对应的空间分辨率为: $\pi a/l\text{ km}$,其中 a 为地球赤道半径。理想情况下,阶数 l 是趋于无穷大的,阶数越高,空间分辨率越高。但是高阶项部分存在较大噪声污染,实际应用中多是截止到一定阶数。当 l 截断到 100,其空间分辨率约为 200 km。鉴于 CSR 数据中心公布的 60 阶的数据被广泛应用,其反演结果精度较高,本文采用该数据,空间分辨率约为 300 km。

4.2 GRACE 数据处理

从 CSR 数据中心获取 GRACE 球谐系数后,进行必要的数据处理。主要包括以下步骤(图 2):

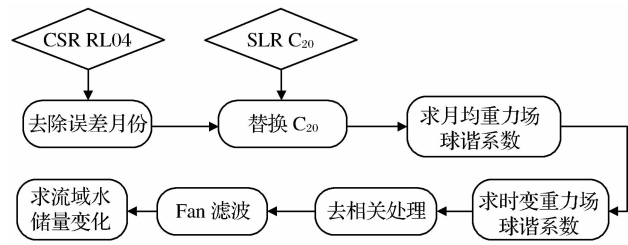


图 2 GRACE 重力卫星数据处理流程图
Fig. 2 Flow chart to calculate terrestrial water storage derived from the GRACE data employed in this study

(1) 在获取的 GRACE 数据集中,去除 2003 年 1 月、2004 年 1、7 和 8 月共 4 个月质量不高的球谐系数,避免引起较大误差。

(2) 替换 GRACE 数据的 C_{20} 项。由于 GRACE 卫星的轨道几何形状对重力场的低阶项不敏感,使得 GRACE 卫星反演得到的低阶项系数(主要是 C_{20} 项)精确度较低^[18]。Chen 等^[19] 研究证明:由卫星激光测距仪(SLR)获取的 C_{20} 项较 GRACE 卫星反演的 C_{20} 项季节性变化更显著。为提高计算结果精度,本文在数据处理过程中采用 SLR 测量得到的 C_{20} 项替换 GRACE 的 C_{20} 项。

(3) 求月均重力场球谐系数。选定 2002~2008 年的月均重力场作为参考标准,求 2002~2008 年的 72 个月模型球谐系数的平均值。

(4) 求时变重力场球谐系数。获取的月水储量变化是由时变重力场球谐系数得到的。从 72 个月重力场球谐系数中减去月均重力场球谐系数得到该值。

(5) 去相关处理。Swenson 等^[20] 根据 GRACE 数据高阶部分携带的相关误差的光谱特征,提出一种去相关滤波处理方法。利用该方法能够较好地去除 GRACE 数据高阶系数相关性引起的条带现象,同时相对较少地减少真实的地球物理信号。

(6) Fan 滤波处理。考虑到球谐数据本身存在卫星测量误差和混入的噪声误差等,需要对数据进行滤波处理。一般采用高斯滤波进行区域平均^[16]来减少误差影响。Zhang 等^[21]认为 GRACE 数据中含有的噪声误差不是单方向的,要进行非各项同性滤波处理,提出一种 Fan 滤波方法,原理是根据噪声的非各项同性,分别对阶次两个方向进行高斯滤波。其研究还表明 Swenson 的去相关法与 Fan 滤波结合的结果优于去相关与高斯滤波的结果。

(7) 根据黑河流域边界进行裁剪,由 $\Delta\sigma/\rho_w$ 计

算得到黑河流域水储量变化。

4.3 流域降水数据及处理

本研究使用黑河流域 19 个气象站和 24 个水文站 2002~2008 年的日降水数据,见图 3 黑河流域的气象水文站点分布。为使得流域整体的降水值更精确,其中还包括了 6 个流域外气象站点的数据。采用 MicroMet^[22]方法将降水插值成 5 km×5 km 的格点数据,并对降水数据进行与 GRACE 数据同样的滤波处理,使得降水数据和 GRACE 水储量具备可比性。

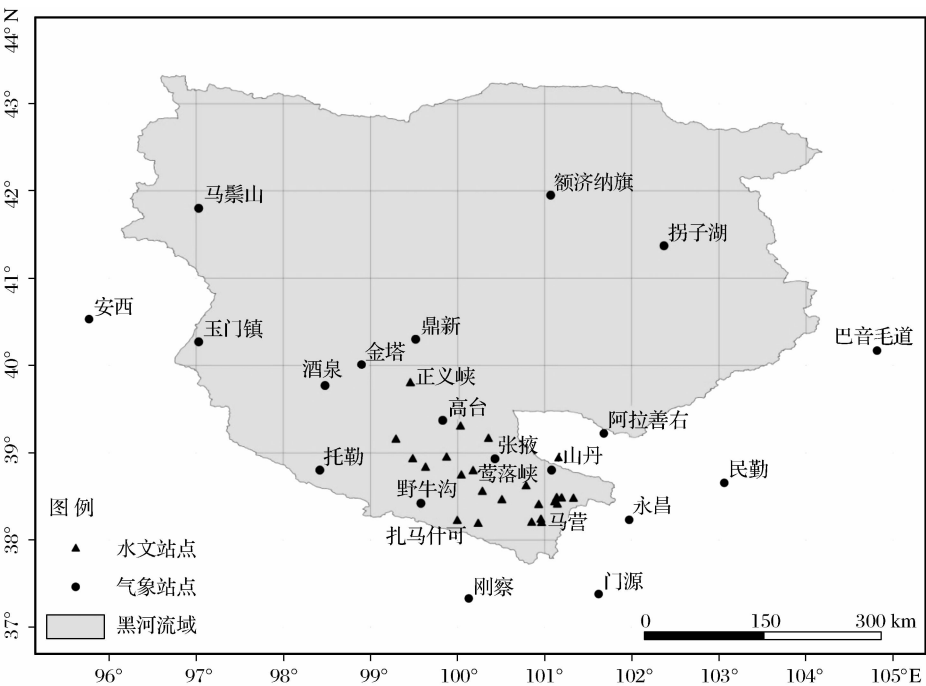


图 3 黑河流域边界及水文、气象站点分布图

Fig. 3 Boundaries of the Heihe river basin and distribution of nearby hydrological and meteorological stations

MicroMet^[22]是一个基于物理机制的插值方法,在气象科学上较为常用。该方法对空气温度、降水、相对湿度等多个气象要素进行时间和空间上的插值,有较好的插值效果。本研究使用 MicroMet 对降水数据进行空间插值,算法如下。

首先采用 Barnes 客观分析法将观测降水数据插值到平面上,得到一个独立于地形的降水分布;然后利用该方法对站点高程进行同样的插值,得到一个流域地形参考面;最后利用该地形参考面对独立于地形的降水值进行符合地形变化的修正,修正函数为:

$$P = P_0 \left[\frac{1 + \chi(Z - Z_0)}{1 - \chi(Z - Z_0)} \right]$$

(6)

其中: P 为插值后的降水值(m/dd), P_0 为站点降水数据(mm/dd), Z_0 为站点高程(m), χ 为研究流域的降水直减率(km^{-1})。

考虑到黑河流域景观丰富,地形复杂,43 个站点分布不均,高程差异大,根据站点降水值及高程值,计算得到黑河流域 2002~2008 年 12 个月的平均降水直减率(见表 1)。

表 1 黑河流域降水直减率 (单位: km^{-1})

Table 1 Average precipitation adjustment factor of the Heihe river basin

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水直减率	0.15	0.26	0.21	0.22	0.26	0.28	0.27	0.26	0.26	0.25	0.18	0.18

5 结果与分析

5.1 GRACE 卫星数据在流域尺度的可应用性分析

黑河流域面积约 27.1 万 km²,上游祁连山及下游额济纳旗盆地、阿拉善高原和巴丹吉林沙漠等地区缺乏地下水测井数据,致使我们短期内无法通过水储量变化平衡方程对 GRACE 反演得到的水储量变化进行验证。然而已有研究表明 GRACE 卫星数据不仅局限于监测较大流域或区域的水储量变化量,在中小流域尺度也被成功应用。Swenson 等^[23]通过去相关滤波处理提高 GRACE 卫星数据反演结果精度,随后将其应用于面积约为 28 万 km² 的 Illinois 地区,并采用该地区实测的土壤水和地下水位数据验证 GRACE 反演结果,两者相吻合。Yeh 等^[24]在 Illinois 地区约 20 万 km² 面积上进行地下水的反演,GRACE 估算得到的区域水储量季节变化量与实测水文数据合成的该区水储量变化量的相关系数达到 0.83,表明 GRACE 在 20 万 km² 区域尺度上同样具有可应用性。2011 年,Famiglietti 等^[25]利用 GRACE 监测加利福尼亚州的中谷地区两个总面积约为 15.4 万 km² 流域的地下水消耗情况,结果也表明 GRACE 卫星数据在监测较小流域水储量变化方面具有潜力。

本文依据 Zhang 等^[21]建议的去相关和 Fan 滤波方法,对 GRACE 数据进行处理,提高结果精度。

据 Zhang 的结果,此方法优于 Yeh 等^[24]采用的去相关和高斯滤波的组合。基于以上分析,我们认为利用 GRACE 卫星监测黑河流域水储量变化较为可靠。

5.2 黑河流域水储量时序变化

黑河流域水储量受多种因素共同制约,在不同时间尺度上受降水、蒸散发等因素影响,表现出水储量变化的不同时序特征。

流域水储量指流域内各个水资源总量,其变化总量包括地下水、土壤水、地表水(水库、河流等)、冰雪水及生物含水量 5 部分变化的总和。分析黑河流域水循环,其水量平衡方程为:

$$\Delta S = P + Q - E - R - W \tag{7}$$

其中: ΔS 为该流域陆地水储量变化, P 为降水, Q 为冰川融水, E 为蒸散发, R 为地表径流, W 为该地区的人类活动用水(包括农业用水、生活用水和工业用水等)。降水和冰川融水为补给源,消耗部分包括地表径流、蒸散发及人类活动用水 3 部分。对于干旱区内陆河黑河流域,作为补给源的冰川融水相对降水较少^[26],降水对水储量变化起主导作用。以下将结合降水情况从月、季和年尺度对 GRACE 估算的水储量变量进行分析。

5.2.1 黑河流域水储量月变化

利用 GRACE 卫星数据反演得到黑河流域 2002 年 8 月~2008 年 12 月的水储量变化,见图 4。

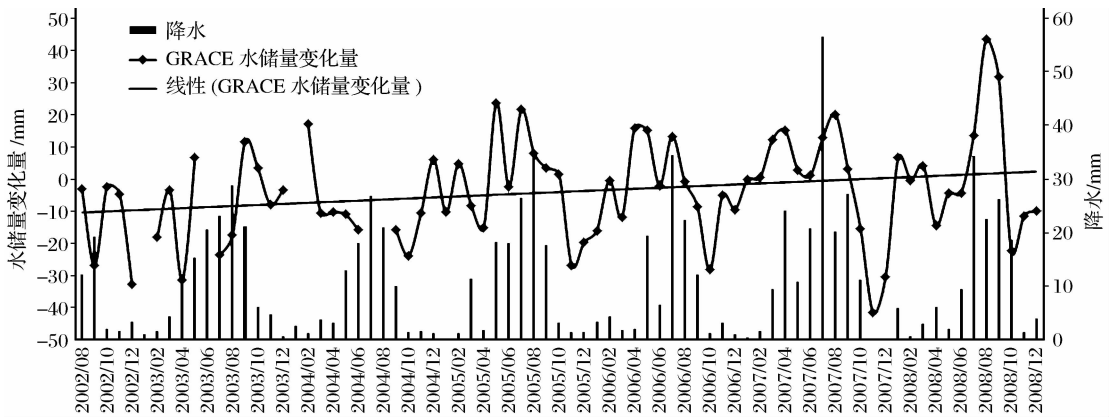


图 4 黑河流域水储量月变化
Fig. 4 Monthly storage change of the Heihe river basin

图 4 中曲线为等效水高表示的黑河流域水储量月变化,左边为其坐标轴,正值表示水储量增加,负值表示水储量减少。在 72 个月里,整个流域水储量变化幅度在±50 mm 内变化,即黑河流域月水储量增加的最大幅度将近 50 mm 等效水高,减少的最大幅度为 40 多 mm 等效水高。整体上看,水储量呈上

升趋势,即进入流域内的水资源总量与损耗水量之差越来越大。

由水储量变化曲线看出每年 7、8 月水储量普遍增加,为一年中水储量的高峰期;12 月水储量处于严重损失状态,减少最多,图 4 显示该流域降水分布特征对这一现象有主导影响。黑河流域是内陆河,

降水是主要供水源,加上受西风环流影响及海拔高度和地形影响,该地区显著特点是每年 6~9 月为降水集中期,12~2 月整个地区降雪稀少,降水量仅占全年降水量的 3.5%^[27]。如图 4 中柱状分布,为 2002~2008 年降水的月分布情况,降水集中期与无降水月份分布明显。在降水多的月份水储量处于增加状态,无降水或降水稀少的月份水储量显著减少。在较短时序上,只能定性分析水储量变化趋势与降水量的关系。但是二者之间并非绝对关系,而且水储量变化量在短时期变化无规律。

5.2.2 黑河流域水储量季节变化

黑河流域水储量不同季度有不同水储量变化,总体上呈规律性的波动。见图 5 黑河流域水储量季节变化分布曲线。图中实线为黑河流域 2002 年秋季至 2008 年秋季的水储量变化曲线,整个水储量在近 20 mm 和 -27 mm 之间浮动变化。虚线为降水分布曲线,降水数据是 2002~2008 年降水的距平分布情况,即每个季度均减去 2002~2008 年这 7 a 共 25 个季度的均值量。

水储量在月份较短时间内变化幅度无规律,从

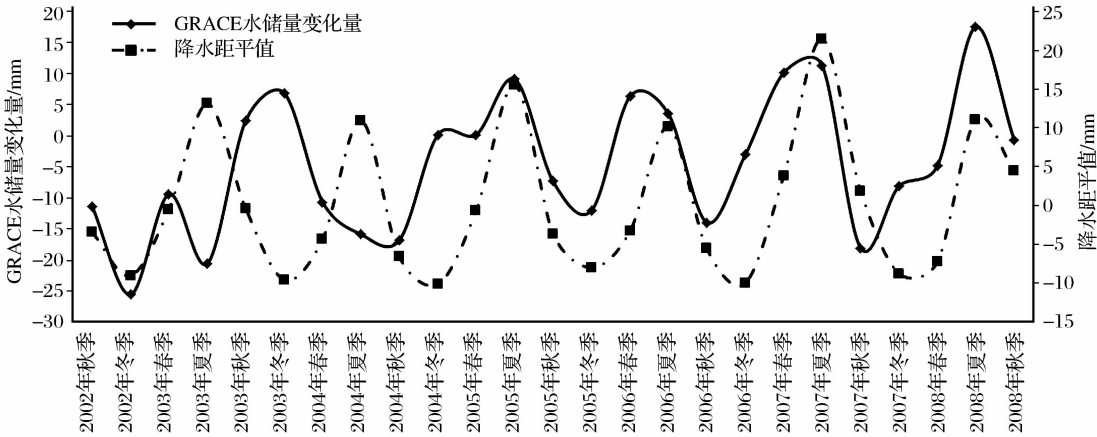


图 5 黑河流域水储量季度变化

Fig. 5 Seasonal storage change of the Heihe river basin

水储量季度变化曲线看出水储量变化有明显的季节性变化特征。2005~2008 年这 4 a 中每年夏季水储量变化处于高峰期,冬季水储量变化接近低谷,即减少最多。这一特征与该流域降水季节性分布有紧密关系。黑河流域是内陆河流域,除部分冰川融水外,降水是其主要水源。对比分析该阶段的水储量变化与降水变化相关性,降水与水储量变化有相似变化特征,在降水增加较多的夏季,水储量增加较多。黑河

流域春季是 3~5 月,该季度是黑河流域农业灌溉时期,大量农业用水,降水量又少使得整个流域的水储量普遍减少。2003 和 2004 年的夏季水储量偏低,因为在实际数据处理过程中,2003 年夏季的 6 月和 2004 年夏季的 7、8 月没有数据导致。

5.2.3 黑河流域水储量年际变化

图 6 为黑河流域水储量年际变化情况。实线表示 2003~2008 年水储量变化,水储量整体呈显著上

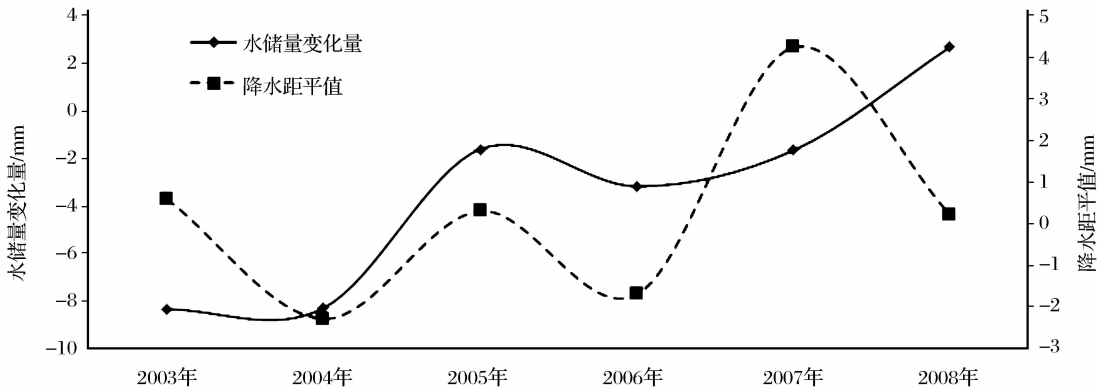


图 6 黑河流域水储量年际变化

Fig. 6 Interannual variation of the Heihe river basin

升趋势;2003~2007 年,黑河流域水资源含量是减少的,2008 年整个流域水储量增加。虚线为对应时期降水距平值的变化分布,可以看出 2004 和 2006 年降水相对均值是减少的;2003 和 2005 年持平;而 2007 年降水量相对年际降水均值增加最多,达到 4.3 mm 等效水高。2007 年降水增加较多可能是引起黑河流域 2008 年水储量显著上升的主要原因。2007 年大量降水累积,致使之后的年份水储量损耗量相对输入水源较少,总体上水储量逐渐上升。理论上,流域水储量是整个水资源的综合量,黑河流域

水储量变化受降水影响很大,此外还需要分析冰川融水、蒸散发等因素的影响。气温升高,冰川融水增多;温度降低,蒸散发量较少,都会使流域水储量资源量增加,反之减少。

5.3 黑河流域水储量空间分布

水储量在空间上受流域地形、地质,流域景观分布等因素影响,使其变化迥异,黑河流域上、中、下游有较大区别的水文特征(图 1),使水储量在空间分布上变化较大(如图 7)。

图 7(a)为黑河流域 2005~2008 年降水距平变

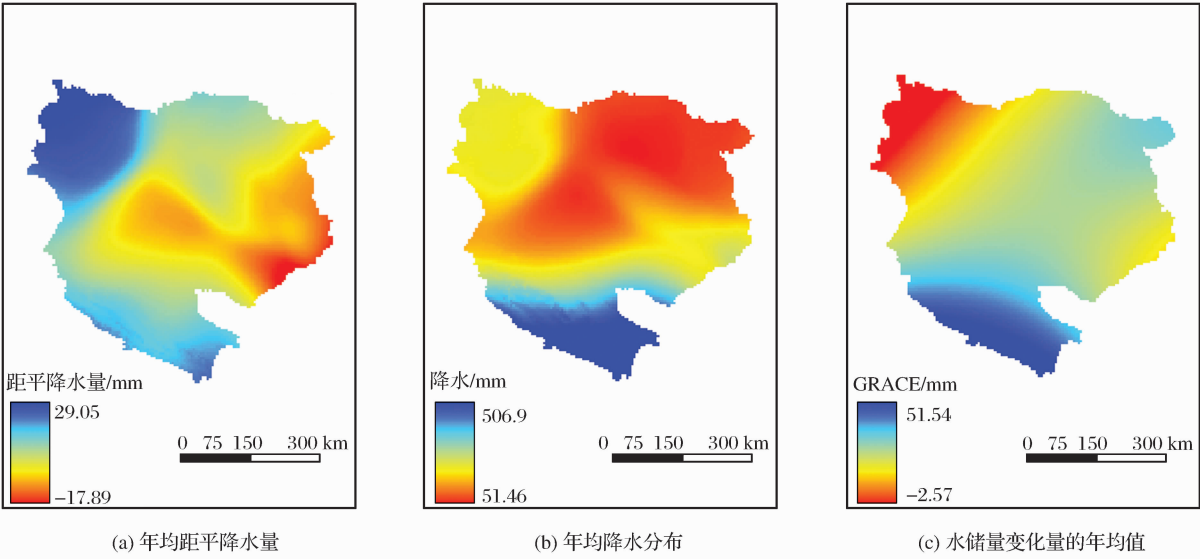


图 7 黑河流域 2005~2008 年水储量及降水年平均空间分布图

Fig. 7 The spatial distribution of the mean annual water storage and precipitation of the Heihe river basin

化的年均值,在下游某些地区降水相对变化很少,即每年降水量几乎不变;有些地区降水变化为负值,说明该地区年均值降水量是减少的,未达到整个流域的年均值降水量。对比同一时期该流域年降水均值总量空间分布,如图 7(b)所示。上游和中游降水较多,下游沙漠地区降水很少。图 7(c)为 2005~2008 年黑河流域水储量年变化均值。数值普遍为正值说明 5 a 里水储量总体是增加的。空间上,上游和中游水储量明显增加较多,下游水储量变化相对少些。整个水储量变化从上游、中游向下游方向递减。总体上降水的空间分布情况与水储量变化是一致的。同时由于黑河流域上、中、下游自然景观差异明显,年均气温及蒸发量均有很大区别,其中上游和中游分布许多常年性河流、季节性河流及较大面积的农业灌溉,下游主要是戈壁荒漠(见图 1)。沙漠地区温度高,蒸发量较大,而降水量少,直接导致其水储量减少;而上中游植被分布较多,河流多,气候相对

下游湿润,蒸发量少,而降水量多,使得水储量增加。这些都对水储量的空间分布有影响,调整水储量空间分布的细部。

水储量变化趋势与降水距平值及降水总量之间的定性比较分析说明 GRACE 重力卫星能够反演得到黑河流域水储量在空间上各个地区的变化趋势。在空间垂直方向上,流域水储量是一个综合量,包含地下水、土壤水、地表水、雪水当量和生物含水量,但是目前仅依靠 GRACE 反演结果无法确定各个组分的变化情况,只能整体说明流域水储量变化趋势。可以进一步结合其他水文数据,具体分析流域水储量变化量与其各组分的关系。

6 结 语

本文利用 GRACE 重力卫星数据反演得到黑河流域 2002 年 8 月~2008 年 12 月的陆地水储量变化趋势。这是 GRACE 卫星在内陆河流域的首次应

用,在国内也是第一次应用于西北部地面实测水文数据较少的地区,将对西部水资源问题的研究产生深远影响。文中分析 GRACE 水储量的月、季节、年时序变化及空间分布特征,并与对应时间空间的降水数据,从时序和空间两方面对比分析。黑河流域水储量不同月份水储量变化比较多变。夏季水储量普遍增多,达到年水储量变化中的最大值;冬季水储量消耗量比收入多,减少达到最大值;春秋几乎呈持平状态。年际呈上升趋势,且 2008 年显著上升,可能是由于 2007 年降水较多引起。空间上由于流域降水分布、植被类型不同,地形差异等多种原因,水储量相应地分布。上中游水储量增加较多,下游沙漠地区水储量变化较少。

流域水储量变化是降水、地下水、地表水等多组分变化的结果,降水变化可能是导致干旱区流域如黑河流域水储量变化的主要因素,但两者关系不是十分明确;进一步理解流域水储量变化与各组分的关系,需要应用陆面过程模型如 Noah,结合地下水、土壤水观测资料,对各组分进行流域尺度的模拟估算。这也是我们下一步的工作方向。

致谢:美国德克萨斯大学空间研究中心(CSR)陈剑利研究员提供了卫星激光测距仪的 C_{20} 系数项;中国科学院测量与地球物理研究所张子占副研究员为该研究提供了宝贵的建议;中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院的杜劲松博士为数据处理过程中的代码运行计算提供大量帮助,在此对 3 位表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] Schmidt R, Schwintzer P, Flechtner F, *et al.* GRACE Observations of Changes in Continental Water Storage[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(1-2): 112-126.
- [2] Hu Xiaogong, Chen Jianli, Zhou Yonghong, *et al.* Seasonal Water Storage Change of the Yangtze River Basin Detected by GRACE[J]. *Science in China*, 2006, 36(3): 225-232. [胡小工, 陈剑利, 周永宏, 等. 利用 GRACE 空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2006, 36(3): 225-232.]
- [3] Zhu Guangbin. Investigations on Time-variations of Continental Water Storage with GRACE Gravity Models[D]. Beijing: Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2007: 1-69. [朱广彬. 利用 GRACE 位模型研究陆地水储量的时变特征[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2007: 1-69.]
- [4] Swenson S, Wahr J, Milly P. Estimated Accuracies of Regional Water Storage Variations Inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(8): 11. DOI: 10. 1029/2002WR001808.
- [5] Yamamoto K, Fukuda Y, Nakaegawa T, *et al.* Landwater Variation in Four Major River Basins of the Indochina Peninsula as Revealed by GRACE[J]. *Earth, Planets and Space*, 2007, 59(4): 193-200.
- [6] Cao Yanping, Nan Zhuotong. Applications of GRACE in Hydrology: A Review[J]. *Remote Sensing Technology and Application*. 2011, 26(5): 543-553. [曹艳萍, 南卓铜. GRACE 重力卫星数据的水文应用综述[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(5): 543-553.]
- [7] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, *et al.* 2005 Drought Event in the Amazon River Basin as Measured by GRACE and Estimated by Climate Models[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. 2008, 114: B5404. DOI: 10. 1029/2008JB006056.
- [8] Winsemius H C, Savenije H, Van de Giesen N C, *et al.* Assessment of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Temporal Signature over the Upper Zambezi[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(12): W12201.
- [9] Moiwo J P, Yang Y, Li H, *et al.* Comparison of GRACE with in Situ Hydrological Measurement Data Shows Storage Depletion in Hai River Basin, Northern China[J]. *Water South Africa*, 2008, 35(5): 663-670.
- [10] Wang Hansheng, Wang Zhiyong, Yuan Xudong. Water Storage Changes in Three Gorges Water Systems Area Inferred from GRACE Time-variable Gravity Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(3): 730-736. [汪汉胜, 王志勇, 袁旭东. 基于 GRACE 时变重力场的三峡水库补给水系统水储量变化[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 730-736.]
- [11] Cheng Guodong, Xiao Honglang, Xu Zhongmin, *et al.* Water Issue and Its Countermeasure in the Inland River Basins of Northwest China—A Case Study in Heihe River Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 406-413. [程国栋, 肖洪浪, 徐中民, 等. 中国西北内陆河水问题及其应对策略——以黑河流域为例[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(3): 406-413.]
- [12] Zhang Hui. Impact of Climate Change and Human Activity on Water Resources in the Heihe River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 1-63. [张辉. 气候变化和人类活动对黑河流域水资源的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 1-63.]
- [13] Wang Lucang, Zhang Xiaoyu. Effect of the Recent Climate Change on Water Resource in Heihe River Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(4): 60-65. [王录仓, 张晓玉. 黑河流域近期气候变化对水资源的影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(4): 60-65.]
- [14] 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. DOI: 10. 1126/science. 1099192.
- [15] Jekeli C. Alternative Methods to Smooth the Earth's Gravity Field[R]. Columbus: Department of Geodetic Science and Surveying, 1981: 1-48.

- [16] 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*, 1998, 103(B12): 30205-30230.
- [17] Strassberg G, Scanlon B R, Chambers D. Evaluation of Groundwater Storage Monitoring with the GRACE Satellite: Case Study of the High Plains Aquifer, Central United States [J]. *Water Resources Research*, 2008, 45: W5410. DOI: 10.1029/2008WR006892.
- [18] Chen J L, Rodell M, Wilson C R, *et al.* Low Degree Spherical Harmonic Influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Water Storage Estimates [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L14405. DOI: 10.1029/2005GL022964.
- [19] Chen J L, Wilson C R. Low Degree Gravity Changes from GRACE, Earth Rotation, Geophysical Models, and Satellite Laser Ranging [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B6402. DOI: 10.1029/2007JB005397.
- [20] Swenson S, Wahr J. Post-processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L8402.
- [21] Zhang Z Z, Chao B F, Lu Y, *et al.* An Effective Filtering for GRACE Time-variable Gravity: Fan Filter [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 36: L17311. DOI: 10.1029/2008GL039459.
- [22] Liston G E, Elder K. A Meteorological Distribution System for High-resolution Terrestrial Modeling (MicroMet) [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(2): 217-234.
- [23] Swenson S, Yeh P J, Wahr J, *et al.* A Comparison of Terrestrial Water Storage Variations from GRACE with in Situ Measurements from Illinois [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): 16401.
- [24] Yeh P, Swenson S C, Famiglietti J S, *et al.* Remote Sensing of Groundwater Storage Changes in Illinois Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42: W12203.
- [25] 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: L3403.
- [26] Cao Meisheng, Li Xin, Chen Xianzhang, *et al.* Remote Sensing of Cryosphere [M]. Beijing: Science Press, 2006: 1-266. [曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. 冰冻圈遥感 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-266.]
- [27] Cao Ling, Dou Yongxiang. The Spatial and Temporal Characteristics and Forecasting Method of Precipitation in Heihe Field [J]. *Arid Meteorology*, 2005, 23(2): 35-38. [曹玲, 窦永祥. 黑河流域降水的时空特征及预报方法 [J]. *干旱气象*, 2005, 23(2): 35-38.]

Monitoring Water Storage Variations in the Heihe River Basin by the GRACE Gravity Satellite

Cao Yanping, Nan Zhuotong

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Using the latest data of GRACE gravity satellites—RL04, published by the CSR, we got the trend of water storage in the Heihe River Basin (HRB) through 2002~2008. In order to improve the inversion accuracy, errors were removed from the data by decorrelation and Fan Filter. Then we analyzed temporal and spatial distribution of water storage variations in the HRB. Results revealed that water storage of HRB features with obviously seasonal characteristic. The amplitude peak of increasing is in summer and declining in winter. Inter-annual analysis showed HRB water storage appears an increasing trend, which is consistent with that of precipitation variations in HRB. Spatially, water storage is greatly influenced by the terrain in HRB, resulting in an increasing trend in the upstream and midstream areas, while a decreasing trend in a part of the downstream area, increasing in other parts.

Key words: GRACE; Water storage variation; Precipitation; The Heihe river basin