

基于多源数据的科尔沁沙地陆地水及 地下水储量变化研究

赵珍珍, 冯建迪

(山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: [目的] 研究科尔沁沙地水储量变化对该区域的生态环境和经济建设等的影响, 为当地水资源的保护和可持续利用提供参考。[方法] 利用 CSR(center for space research)提供的 2003. 07~2010. 12 GRACE(gravity recovery and climate experiment)Release-05 数据, 采用去相关与高斯平滑滤波(平滑半径 300 km)相结合的滤波方法, 以及尺度因子法进行了重力信号改正和信号泄露恢复, 反演了科尔沁沙地陆地水储量长时间序列的变化, 该结果与 CPC(climate prediction center)水文模型反演结果进行了对比分析; 结合 GLDAS(global land data assimilation system)水文模型计算的土壤含水量变化, 给出了科尔沁沙地地下水储量的时空变化; 并利用监测点水井数据和给水度信息对地下水反演结果进行了初步验证。[结果] 2003 年 7 月至 2010 年 12 月科尔沁沙地陆地水储量减少速率为 -13.2 ± 2.6 mm/a; 地下水下降速率为 -13.5 ± 1.9 mm/a。[结论] 干旱和农业灌溉是导致科尔沁沙地地表水减少和地下水位降低的重要原因之一。

关键词: GRACE; 科尔沁沙地; 陆地水储量; 地下水储量; 水文模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0119-07

中图分类号: P333

文献参数: 赵珍珍, 冯建迪. 基于多源数据的科尔沁沙地陆地水及地下水储量变化研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 119-125. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 03. 020; Zhao Zhenzhen, Feng Jiandi. Investigation of water storage variation in Horqin sandy land based on multi-source data[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 119-125.

Investigation of Water Storage Variation in Horqin Sandy Land Based on Multi-source Data

Zhao Zhenzhen, Feng Jiandi

(School of Architecture and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

Abstract: [Objective] The impact of water storage variation on the local ecological environment and economic construction in the Horqin sandy land was studied in order to provide reference for the protection and sustainable utilization of local water resources. [Methods] Using gravity recovery and climate experiment (GRACE) Release-05 data from July 2003 to December 2010 provided by center for space research(CSR), the long-time series of terrestrial water reserves in Horqin sandy land were retrieved by using the filtering method combining the decorrelation filter with the Gauss smoothing filter (smooth radius 300) and the scaling factor method. The result was compared with the Climate Prediction Center(CPC) hydrological model inversion. Based on soil moisture content changes calculated by GLDAS hydrological model, the temporal and spatial variation of ground water storage was retrieved. This result was preliminarily verified by monitoring well data and feed water information. [Results] The reduction rates of terrestrial water storage and ground water storage were 13.2 ± 2.6 and 13.5 ± 1.9 mm/a, respectively from July 2003 to December 2010. [Conclusion] Drought and agricultural irrigation are one of the important reasons leading to the decrease of surface water and groundwater level in Horqin sandy land.

收稿日期: 2018-12-26

修回日期: 2019-01-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于多源数据且顾及异常现象的全球电离层 TEC 经验模型建立方法研究”(41804032)

第一作者: 赵珍珍(1987—), 女(汉族), 山东省嘉祥县人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事资源环境遥感方向研究。E-mail: zzzhao@whu.edu.cn.

通讯作者: 冯建迪(1988—), 男(汉族), 山东省巨野县人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事 GNSS 数据处理方向研究。E-mail: jdfeng@whu.edu.cn.

Keywords: gravity recovery and climate experiment (GRACE); Horqin sandy land; terrestrial water storage; ground water storage; hydrological model

水是生命的起源,更是人类生存和发展的基本条件之一。作为一种基础资源,水被广泛应用于工业、农业、生活、娱乐等人类活动。对于整个生态系统,水资源的地位举足轻重,影响着全球气候演变、全球水循环和生物多样性等基本的生态因素^[1-2]。根据不同的空间分布,水资源一般分为两大类:地表水和地下水。地下水资源具有水质好、蓄水稳定、分布广泛、易于开发等特点,是重要的淡水资源之一。在人们的生产生活中,地下水也担任了重要的角色。很多地方,地下水可被直接抽取饮用,作为农村和城市居民生活用水。在农业生产中,地下水是优质的灌溉水源,被大量抽取使用。另外,由于其获取途径方便、成本低等因素,地下水也被广泛应用于工业和矿产开发生产中。

然而,作为一种极其宝贵的淡水资源,地下水正面临着污染和被过量开采的现状。目前,水资源匮乏已发展成为一个日益严重的全球性生态问题,特别是在干旱和半干旱地区尤为突出^[3-5]。根据 2012—2016 年世界经济论坛年度全球风险调查,水资源危机是全球十大风险之一,排在前三位。

科尔沁沙地位于中国北方,属于半干旱和半湿润的过渡性气候。年度降水量变化很大,近年来呈现波动下降的态势。地表水资源日益减少,河流几近干涸。农业、工业、畜牧业及城市生活用水越来越依赖于地下水。因长期超量开采地下水,地下水位已严重下降。

水资源的实时动态监测是实现水资源的保护和管理的重要参考之一。水资源的监测手段有很多。传统的方法有河流/水库监测站、地下水位监测井等。传统的监测站和监测井,易受地理环境影响,测站数量相对稀少、总体分布不均匀,监测能力有限。另外,有些水文数据属于内部参考资料,出于信息安全等因素,不对外公布。以上因素很大程度上限制了对水资源的监测、管理、保护和研究。

始于 2002 年的 GRACE (gravity recovery and climate experiment, 重力恢复和气候探测任务) 卫星重力任务为水资源的监测研究开辟了一条崭新的道路。GRACE 提供的月重力场模型,可用来监测地球表面浅层物质质量迁移。对陆地水储量变化的监测是 GRACE 的重要应用之一。另外,结合陆地水文资料或水文模型,GRACE 也可用于地下水储量变化的监测^[6]。目前,利用 GRACE 重力数据监测陆地水储量变化(地下水储量变化)的研究很多,研究区域大多

是水量丰富的大河流域以及水资源匮乏的干旱和半干旱区。例如,密西西比河流域^[7-8]、尼罗河流域^[9]、亚马逊河流域^[10-12]和恒河流域^[13-14]等。在中国区域,华北平原^[15]、新疆天山山区^[16]、海河流域^[17]、黑河流域^[18-19]和长江流域^[19]等区域的水资源监测一直是一个热门的话题。

以上研究多集中在大河流域以及部分干旱和半干旱区,很少涉及科尔沁沙地水资源的研究。为了实现科尔沁沙地水资源监测,本文拟联合 GRACE 重力数据、水文模型、监测点水井数据及给水度信息,建立科尔沁沙地水资源监测体系,反演该地区陆地水储量变化和地下水储量变化,以期当地水资源的保护和可持续利用提供参考。

1 研究区概况

科尔沁沙地是中国最大的沙地(北纬 $42^{\circ}30'$ — $45^{\circ}30'$,东经 119° — 124°),平均海拔高度为 178.5 m,呈现西高东低,行政区域上包括 18 个县(市、旗),总面积 5.06×10^4 km²。科尔沁沙地属于半干旱农牧交错区,耕地和草地之间不断发生互相转换,土质松散、黏连性差,为土地沙化提供了物质基础。同时,该地区降水量少,年平均降水量为 371.3 mm,而且年际降雨量波动性大,1980 年的年均降雨量只有 198.7 mm,1991 年年均降雨量达到了 577.6 mm,经常出现干旱年份,以及偶尔发生洪涝灾害;年内降雨不均,降雨主要集中在夏季,占总降水量的 69.6%,为丰水期,而春季和秋季总降水比例不足 30%,冬季降水量只占百分之一左右。降雨量直接影响该地区的土壤含水量,以及地表水面积和地下水水位变化。

同时,科尔沁沙地人口数量稳步上升,从 1980 年的 2.37×10^6 人,增长到 2016 年的 3.13×10^6 人,35 a 的时间里人口增加了 32.1%。伴随着人口的快速增长,为满足生活需求,耕地面积和牲畜存栏量也在不断增加。科尔沁沙地经济水平不断提高,GDP 从 1999 年的 1.35×10^{10} 元,经过 16 年的发展,到 2016 年末达到了 1.95×10^{11} 元,增长了 14 倍;农牧民人均纯收入从 1999 年的 2 028 元,增长到 2014 年的 9 932 元,增加到原来的近 5 倍;产业结构由最初的以第一产业为主,逐渐转变为第二产业占据主要地位,第三产业次之,第一产业的比重最小。科尔沁沙地特殊的地理位置、气候特征和人为因素,共同决定了该地区地表水和地下水的不断减少、沙地范围大并呈现出波动性变化等生态环境问题。

2 反演方法

利用 GRACE 时变重力场反演地表面质量变化的计算模型可以表示如下^[20]:

$$\Delta\bar{\sigma}(\theta, \lambda) = \frac{R\rho_{ave}}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_1} [\Delta C_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{lm} \sin(m\lambda)] \quad (1)$$

式中: θ ——地心余纬; λ ——地心经度; R ——地球的平均半径; ρ_{ave} ——地球平均密度($5\ 517\ \text{kg}/\text{m}^3$); \bar{P}_{lm} ——规格化缔合勒让德函数; k_1 ——勒夫数; ΔC_{lm} 和 ΔS_{lm} ——地球重力场球谐系数相对其均值的变化量。

由于 GRACE 任务的飞行特点、共轨星间跟踪观测模式、轨道误差、大气和海洋模型误差等因素,由原始观测数据解算的地球重力场模型球谐系数存在条带误差和低频误差。为了削弱这些误差的影响,本文采用去相关滤波与高斯滤波(平滑半径为 300 km)的组合滤波方法,经过去相关滤波和高斯滤波以后,公式(1)变为:

$$\Delta\bar{\sigma}(\theta, \lambda) = \frac{R\rho_{ave}}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_1} W_l \bar{P}_{lm}(\cos\theta) [\Delta \hat{C}_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta \hat{S}_{lm} \sin(m\lambda)] \quad (2)$$

式中: W_l —— l 阶高斯平滑核函数。该函数可以通过一组递推公式表示:

$$W_0 = 1 \quad (3)$$

$$W_1 = \frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \quad (4)$$

$$W_{n+1} = -\frac{2n+1}{b} W_n + W_{n-1} \quad (5)$$

其中,

$$b = \frac{\ln 2}{1 - \cos(r/R)} \quad (6)$$

式中: r ——“半宽”常数,即高斯平滑半径; R ——地球的平均半径。

经过去相关滤波和高斯平滑滤波数据处理,GRACE 数据中的干扰因素已被剔除,剩余的信息为地球表面质量迁移带来的重力异常。在较短的时间尺度内,地球表面质量迁移一般是指陆地水储量变化。陆地水储量变化可进一步转换为等效水高的形式,公式为

$$H = \Delta \bar{\sigma} / \rho \quad (7)$$

式中: ρ ——水的密度($1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$); H ——等效水高。

本文采用 Landerer 和 Swenson(2012)提出的尺度因子法,其基本原理是利用最小二乘技术,以滤波前 GLDAS-NOAH 得到的水储量信号与滤波后的水

储量信号之差的最小为目标,求解得到尺度因子^[21]为 0.7。一个区域的陆地水储量变化包括:土壤含水量、地表径流、积雪和冰川以及地下水的变化,可以用公式(8)表示^[22]。将土壤含水量、地表径流、积雪和冰川的变化从 GRACE 计算的陆地水储量变化中扣除,即可得到地下水储量变化,从而实现利用 GRACE 重力数据监测地下水储量的目的^[23]。

$$\Delta T_{WS} = \Delta S_{MS} + \Delta S_{MES} + \Delta R_{ESS} + \Delta G_{WS} \quad (8)$$

其中: ΔT_{WS} ——陆地水储量变化; ΔS_{MS} ——土壤含水量变化; ΔS_{WES} ——积雪和冰川变化; ΔR_{ESS} ——地表径流变化; ΔG_{WS} ——地下水储量变化。

鉴于科尔沁沙地的实际情况和已有的资料,在计算科尔沁沙地的地下水储量变化时,本文不考虑积雪和冰川以及地表径流的变化,仅计算了占地表水主导地位的土壤含水量变化。那么,公式(8)简化为:

$$\Delta T_{WS} = \Delta S_{MS} + \Delta G_{WS} \quad (9)$$

该简化的水资源平衡公式已被应用于多个地区的地下水储量变化的研究中^[18,24-25]。

3 结果与分析

3.1 基于 GRACE 数据反演陆地水储量变化

本文采用德克萨斯大学 CSR(center of space research)空间研究中心提供的 200307—201012 GRACE Release-05 Level-2 数据,对其进行去相关滤波与高斯滤波(平滑半径为 300 km)的组合滤波方法处理后,反演了科尔沁沙地陆地水储量变化时间序列(图 1)。

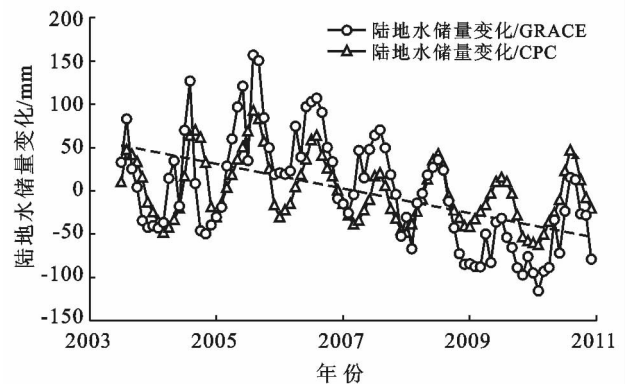


图 1 基于 GRACE 数据和 CPC 水文模型的科尔沁沙地陆地水储量变化(200307—201012)

由 GRACE 时变重力场数据反演得到科尔沁沙地 200307—201012 的陆地水储量下降速率为 $-13.2 \pm 2.6\ \text{mm}/\text{a}$ (下降速率即为等效水高的变化率,下同)。同时,本文采用全球水文模型 CPC(climate prediction center)进行对比分析,该模型是根据全球

观测的降水分布而建立,采用的数据包括全球降水数据、温度、潮湿度、水平风速、地表大气压和太阳辐射数据等。CPC 提供的产品包括地表积雪分布及其厚度、地表以下 4 层的土壤含水量、土壤温度等。作为验证数据,CPC 水文模型得到的陆地水储量变化与 GRACE 的结果进行比较。从图 1 可以看出:① GRACE 数据和 CPC 水文模型反演的科尔沁沙地陆地水储量结果整体上均呈现持续减小趋势,具有较好的一致性;②二者具有相似的季节变化特性,相关系数为 0.72。需要注意的是,CPC 水文模型计算的水储量变化振幅略小于 GRACE 的结果。这是因为 GRACE 的水储量变化是所有陆地水变化的总和,相对于 CPC 的结果来说,还包含了其他的地表质量变化(如地表生物总含水量变化和固体地球质量变化)。

3.2 基于 GRACE 和 GLDAS 水文模型反演地下水储量变化

本文构建了两种科尔沁沙地地下水储量变化反演方法:一是联合 GRACE 数据和水文模型反演地下水储量变化;二是利用监测点水井数据和给水度数据确定地下水储量变化。最后,将这两种方法计算的科尔沁沙地地下水储量变化结果进行比较,相互验证。

本文利用 GLDAS 水文模型计算了科尔沁沙地的土壤含水量变化(如图 2 所示)。从图 2 中可以看出,科尔沁沙地的土壤含水量存在明显的季节变化特性,在夏季达到最大值,在春冬季达到最小值。科尔沁沙地位于中国北方,属于温带大陆性气候特性。夏季炎热,受东南季风的影响,降水较多,占全年降水量的 70%~80%;春冬季多偏北风和西北风,空气干燥,降水稀少。

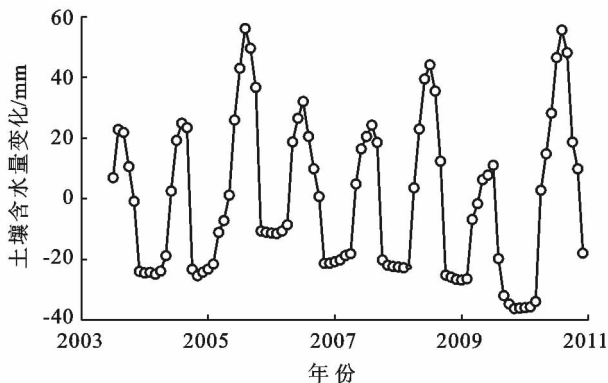


图 2 基于 GLDAS 水文模型的科尔沁沙地土壤含水量变化(200307—201012)

图 3 记录了 2003 年到 2010 年科尔沁沙地的降雨量月均值序列。通过对比图 2 和图 3 可知,科尔沁沙地的土壤含水量与降雨量是密切相关的,二者存在

明显的正相关关系。根据 GRACE 数据计算的陆地水储量变化减去 GLDAS 水文模型计算的土壤含水量变化,得到了科尔沁沙地的地下水储量变化(如图 4 所示)。从图 4 中可以看出,2003 年 7 月到 2010 年 12 月期间,科尔沁沙地的地下水储量总体上呈现下降趋势,总体下降速率为 -13.5 ± 1.9 mm/a。其中,2003 年 7 月到 2005 年 7 月,地下水储量是增加的,速率为 30.2 ± 4.1 mm/a;从 2005 年 1 月开始,地下水储量急剧下降,到 2009 年 12 月,地下水储量下降速率为 -26.7 ± 2.7 mm/a;2009 年 7 月到 2010 年 12 月,地下水储量依然处于下降态势,但下降速率明显减缓,为 -6.0 ± 1.9 mm/a。

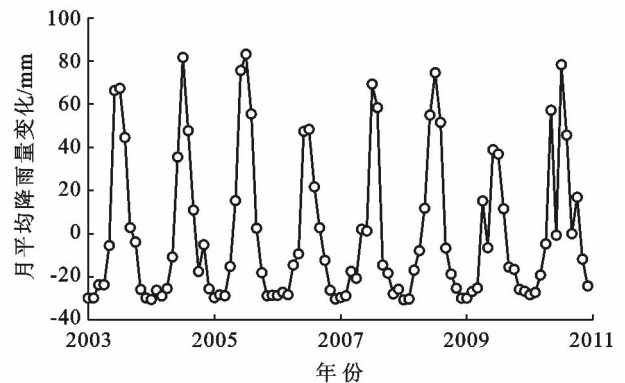


图 3 2003—2010 年科尔沁沙地月平均降水量变化

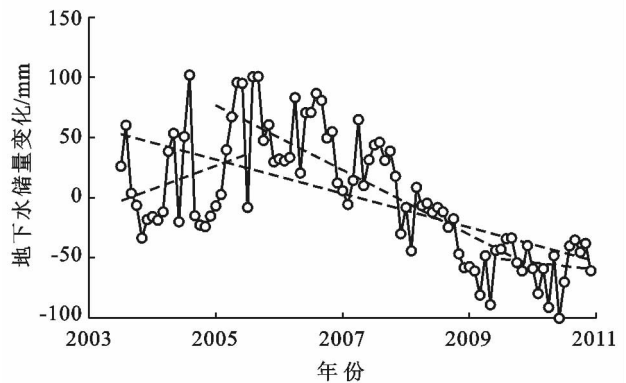


图 4 基于 GRACE 数据和 GLDAS 水文模型的 200307—201012 科尔沁沙地地下水储量变化

3.3 基于监测点水井数据和给水度反演地下水储量变化

3.3.1 基于监测点水井数据反演地下水位变化 本文使用了《中国地质环境监测地下水位年鉴》记录的地下水数据,研究了科尔沁沙地的地下水位变化。根据年鉴记录,内蒙古自治区通辽市科尔沁沙地区域共分布着 6 个国家级地下水监测点。将每个监测点的 2005—2010 年地下水月平均水位提取出来,计算得到 6 个监测点的地下水位变化序列。再将 6 个监测

点的地下水位变化序列求平均值,得到了科尔沁沙地2005—2012年的月平均地下水变化序列(如图5所示)。从图5可以看出,科尔沁沙地地下水位一直处于下降的趋势。

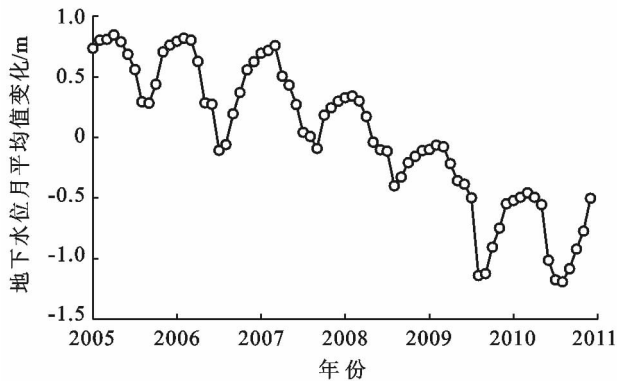


图5 2005—2010年科尔沁沙地地下水位月平均变化量

3.3.2 基于监测点水井数据和给水度反演地下水储量变化 本文根据研究区域内估算的潜水含水层的给水度结果和相关的给水度室内试验数据,利用Kriging模型算法,估计了科尔沁沙地的给水度数值,估值的均方根误差优于0.001。考虑到区域均值的不确定性,科尔沁沙地给水度的取值区间为:(0.09~0.1)。将监测点水井数据得到的地下水位变化乘以给水度,即可得到地下水储量变化。图6给出了200501—201012科尔沁沙地的地下水储量变化,包含了给水度取0.09和0.10的计算结果。根据地下水消耗的速率,将科尔沁沙地的地下水储量变化分为两个阶段:200501—200912,地下水下降速度较快,下降速率为 -29.1 mm/a (给水度取0.1)和 -26.04 mm/a (给水度取0.09);200907—201012,地下水下降速度有所减缓,下降速率为 -6.1 mm/a 给水度取0.1)和 -5.5 mm/a (给水度取0.09)。

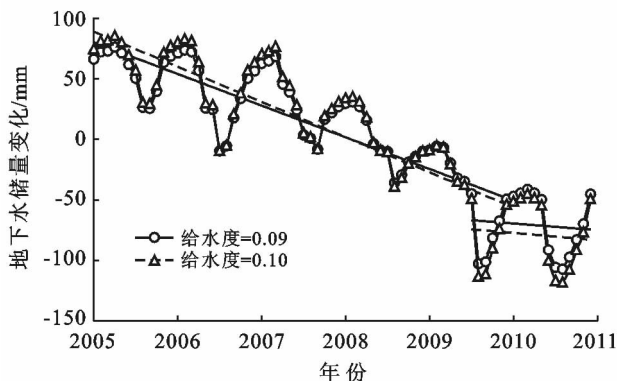


图6 基于监测点水井数据的2005—2010年科尔沁沙地地下水储量变化

3.4 科尔沁沙地地下水储量变化结果比较分析

基于GRACE数据和GLDAS水文模型得到的地下水储量变化,与监测点水井数据得到的地下水储量变化进行比较(如表1所示)。由于《中国地质环境监测地下水年鉴》记录的地下水信息始于2005年,所以对比时间段选取200501—201012。从表1可以看出,这两种方法得到的地下水储量变化在此期间是一致的。两种方法相互验证,增加了科尔沁沙地地下水储量变化结果的可靠性。

表1 不同阶段GRACE和水井数据监测的地下水变化结果比较

| 时间段 | 计算方法 | 变化趋势/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) |
|---------------|------------|--|
| 200501—200912 | GRACE和水文模型 | -26.7 ± 2.7 |
| | 监测点水井数据 | $(-29.1, -26.04)$ |
| 200907—201012 | GRACE和水文模型 | -6.0 ± 1.9 |
| | 监测点水井数据 | $(-6.1, -5.5)$ |

综合分析GRACE数据、GLDAS水文模型、监测点水井数据和给水度信息得到的科尔沁沙地地下水储量变化可知,2003—2010年科尔沁沙地的地下水储量呈现消耗的趋势,消耗速率为 $-13.5 \pm 1.9 \text{ mm/a}$,其中200501—200912月,地下水储量消耗最快,2009年7月以后,地下水储量有所恢复,下降速率减缓。

3.5 科尔沁沙地水储量变化成因分析

结合气象数据和当地农业模式分析科尔沁沙地水储量变化的成因。首先,分析了科尔沁沙地降水量与陆地水储量变化的关系。图7给出了2003—2010年科尔沁沙地的年降水量数据,其中,年降水量的最大值出现在2010年,最小值出现在2009年。根据相关研究报告,2009年中国北方发生了严重的干旱^[26]。同时结合图2可以看出,由GRACE数据得到的2009年科尔沁沙地陆地水储量下降最为明显。随着降水量的增加,从2010年开始陆地水储量有所恢复。此外,2006—2009年的降水量均处于较低的水平,平均约为310 mm,是导致科尔沁沙地陆地水储量多年下降态势的主要原因之一。

然后,从科尔沁沙地的农业生产模式方面分析了当地地下水储量消耗的原因。科尔沁沙地的农作物种类繁多,包括玉米、向日葵、果树、各种蔬菜等。其中,玉米为当地的主要粮食作物,被大面积广泛种植。研究表明,当地玉米的种植面积占农作物总种植面积的70%^[27-28]。玉米是一年生单子叶草本植物,秸秆很高,枝叶茂盛,生长过程中需水量很大。

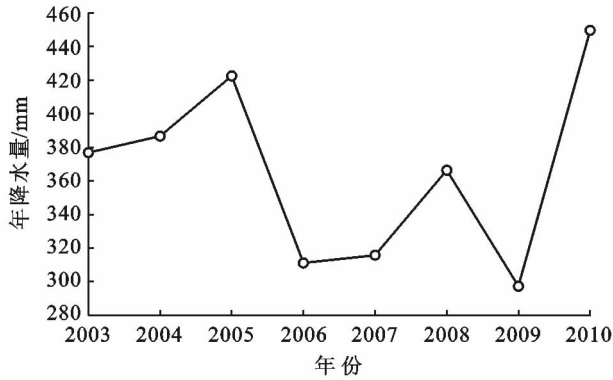


图 7 2003—2010 年科尔沁沙地年降水量变化趋势

在科尔沁沙地,年平均降水量仅为 350 mm,发生在玉米生长周期内的降水占全年降水的 70% 左右。玉米生长需水量很大,仅依靠自然降雨是不能满足玉米对水分需求的。本文引用张铜会等^[27]的研究结果(如表 2 所示),展示了科尔沁沙地玉米耗水量及用水来源^[29]。玉米的生长周期分为 4 个阶段:播种—拔节、拔节—抽穗、抽穗—灌浆、灌浆—成熟。从表 2 可以看出,在不同的生长阶段,玉米对水的需求是不同的。此外,从该表中还可以看出,玉米总的耗水量已超过当地降雨量,因此,需要抽取地下水进行灌溉。灌溉水量占到了玉米总耗水量的 37% 左右。特别是在播种—拔节和拔节—抽穗阶段,灌溉水量所占比例高达 60% 左右。

表 2 科尔沁沙地玉米不同生长阶段的需水特点^[27]

| 生长阶段 | 时间/d | 总耗水量/mm | 降雨量/mm | 灌溉量/mm | 灌溉量比例/% |
|-------|------|---------|--------|--------|---------|
| 播种—拔节 | 42 | 67.7 | 28.2 | 40 | 59.08 |
| 拔节—抽穗 | 40 | 164.4 | 92.6 | 106.7 | 64.90 |
| 抽穗—灌浆 | 18 | 102.2 | 68.4 | 26.7 | 26.13 |
| 灌浆—成熟 | 35 | 130.3 | 75.2 | 0 | 0.00 |
| 合计 | 135 | 464.6 | 264.4 | 173.4 | 37.32 |

结合图 7 可知,2006—2009 年间,科尔沁沙地的降水量严重不足,低于平均值。为了抵御干旱,确保农作物的产量,更多的地下水被抽取到地面,用于灌溉。与此同时,地表蒸发量也随之更加。水资源大量被消耗,地下水得不到足够的补给,导致地下水位不断下降。

图 8 是利用 2005—2010 年《中国地质环境监测地下水水位年鉴》地下水水位数据计算的科尔沁沙地地下水水位季节变化。从图中可以看出,每年的地下水位从 3 月份开始下降,一直到 8 月份下降至最低点。8 月份以后,地下水得以补给,水位上升。根据前文描述的当地农业模式和降水特点,地下水消耗和恢复的过

程可以理解为:春季降雨稀少,当地居民大量抽取地下水以对抗春旱,导致地下水从 3 月份开始下降;夏季农作物生长的过程中,水的需求量是巨大的,降雨量不能满足农作物的生长需求,因此大量地下水被不间断的抽取到地面,导致地下水位持续性下降;秋季农作物开始成熟,对水的需求也在逐渐减少,地下水得以恢复;秋季以后直到冬季结束,该地区无农作物生长,地下水在冬末春初时,恢复到最大值。另外,从图 8 中还可以发现,虽然地下水存在消耗和恢复的周期性,但是每年的地下水位都不能恢复到最初的水位,地下水位在不断的下降。

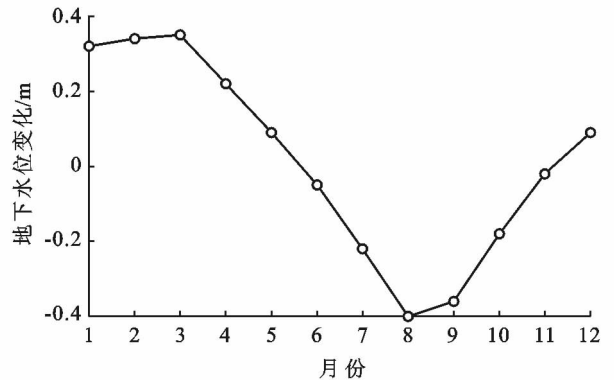


图 8 基于监测点水井数据的 2005—2010 年科尔沁沙地地下水水位季节变化

4 讨论与结论

本文采用 200307—201012 的 GRACE 时变重力场模型 Release-05 Level-2,采用去相关滤波与高斯平滑滤波(平滑半径 300 km)结合的滤波方法,反演了科尔沁沙地陆地水储量变化,将其与 CPC 水文模型反演结果进行了对比分析;结合 GLDAS 水文模型计算了土壤含水量变化,并分析了科尔沁沙地地下水处理变化的时空特征;利用监测点水井数据和给水度信息确定地下水储量变化,并与 GRACE 反演结果进行了初步验证。研究表明:①科尔沁沙地陆地水储量整体呈现减少趋势,减少速率为 -13.2 ± 2.6 mm/a,与 CPC 水文模型反演结果具有较好的一致性;②科尔沁沙地地下水储量整体上呈现下降趋势,下降速率为 -13.5 ± 1.9 mm/a,与监测点水井数据反演结果具有较好的一致性。

结合气象数据和当地农业模式分析了科尔沁沙地水储量变化的成因:首先,降水量变化与陆地水储量变化有直接关系,2003—2010 年期间,年降水量最小值出现在 2009 年,此时对应的科尔沁沙地的陆地水储量下降最为明显,年降水量最大值出现在 2010

年,此时期的陆地水储量也开始有所恢复;第二,根据科尔沁沙地玉米不同生长阶段需水量以及对应阶段降水量的特点,发现干旱和农业灌溉是导致地表水减少和地下水位降低的重要原因之一。

基于 GRACE 卫星时变重力场数据反演长时间序列、大尺度的陆地水储量变化和地下水储量变化,该方法有效地弥补了传统水文监测中因观测站点分布不均匀、观测范围有限等因素导致资料获取不充分、数据不均匀的缺陷。随着后续卫星重力探测计划的相继实施、时变重力场反演方法的改进和水文模型的日趋完善,将进一步提高卫星重力观测结果中地球物理信号的时空分辨率,以及信号分离和提取的精度,为研究固体地球物质迁移以及精化和验证全球和局部水文模型提供可靠的地球物理信息。

[参 考 文 献]

- [1] Dams J, Woldeamlak S T, Batelaan O. Predicting land-use change and its impact on the groundwater system of the Kleine Nete catchment, Belgium[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008,12(6):1369-1385.
- [2] Moiwo J P, Yang Yonghui, Li Huilong, et al. Impact of water resource exploitation on the hydrology and water storage in Baiyangdian Lake[J]. *Hydrological Processes*, 2010,24(21):3026-3039.
- [3] Strassberg G. Evaluation of groundwater storage monitoring with the GRACE satellite: Case study of the High Plains aquifer, Central United States[J]. *Water Resources Research*, 2009,45(5):195-211.
- [4] Scanlon B R, Keese K E, Flint A L, et al. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions[J]. *Hydrological Processes*, 2010,20(15):3335-3370.
- [5] Zhao Zhenzhen, Lin Aiwen, Feng Jiandi, et al. Analysis of water resources in Horqin sandy land using multisource data from 2003 to 2010[J]. *Sustainability*, 2016,8(4):374.
- [6] Wada Y, van Beek L P H, van Kempen C M, et al. Global depletion of groundwater resources[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010,37(20):114-122.
- [7] Syed T H, Famiglietti J S, Chen J, et al. Total basin discharge for the Amazon and Mississippi River basins from GRACE and a land-atmosphere water balance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005,32(24):348-362.
- [8] Freedman F R, Pitts K L, Bridger A F C. Evaluation of CMIP climate model hydrological output for the Mississippi River Basin using GRACE satellite observations[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,519(D):3566-3577.
- [9] Bonsor H C, Mansour M M, Macdonald A M, et al. Interpretation of GRACE data of the Nile Basin using a groundwater recharge model[J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2010(7):4501-4533.
- [10] Xavier L. Interannual variability in water storage over 2003—2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010,114(8):1629-1637.
- [11] Chen Jinli, 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):439-445.
- [12] Frappart F, Ramillien G, Ronchail J. Changes in terrestrial water storage versus rainfall and discharges in the Amazon basin[J]. *International Journal of Climatology*, 2013,33(14):3029-3046.
- [13] Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India[J]. *Nature*, 2009,460(7258):999-1002.
- [14] Khan H H, Khan A, Ahmed S, et al. Terrestrial water dynamics in the lower Ganges—estimates from ENVISAT and GRACE[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2012,6(10):3693-3702.
- [15] Feng Wei, Zhong Min, Lemoine J M, et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the gravity recovery and climate experiment (GRACE) data and ground-based measurements[J]. *Water Resources Research*, 2013,49(4):2110-2118.
- [16] 许民,叶柏生,赵求东,等.利用 GRACE 重力卫星监测新疆天山山区水储量时空变化[J]. *干旱区研究*, 2013,30(3):404-411.
- [17] Moiwo J P, Yang Yonghui, Li Huilong, et al. Comparison of GRACE with in situ hydrological measurement data shows storage depletion in Hai River basin, Northern China[J]. *Water SA*, 2009,35(5):663-670.
- [18] 袁伟,郭宗楼,吴军林,等.黑河流域水资源承载能力分析[J]. *生态学报*, 2006,26(7):2108-2114.
- [19] 超能芳,王正涛,孙健.各向异性组合滤波法反演陆地水储量变化[J]. *测绘学报*, 2015,44(2):174-182.
- [20] 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):3-13.
- [21] Landerer F W, Swenson S C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates[J]. *Water Resources Research*, 2012,48(4):4531-4541.

- using 5% and 10% garbage enzyme solution[J]. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering & Management Science*, 2013,3(4):111-117.
- [10] Tang F E, Tong C W. A study of the garbage enzyme's effects in domestic wastewater[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011,60:1143-1148.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版,北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 柳敏,宇万太,姜子绍,等. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应[J]. *土壤通报*,2007,38(4):758-764.
- [13] 韩剑宏,李艳伟,姚卫华,等. 玉米秸秆和污泥共热解制备的生物质炭及其对盐碱土壤理化性质的影响[J]. *水土保持通报*,2017,37(4):92-98.
- [14] Allison L E, Brown J W, Hayward H E, et al. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[J]. *Aibs Bulletin*, 1968, 120(3):290.
- [15] Liu Liping, Long Xiaohua, Shao Hongbo, et al. Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province, China[J]. *Ecological Engineering*, 2015,81:328-334.
- [16] 毛玉梅,李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J]. *中国环境科学*,2016,36(1):225-231.
- [17] Nazim F, Meera V. Comparison of treatment of greywater using garbage and citrus enzymes[J]. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2017,6(4):49-54.
- [18] Lee J J, Park R D, Kim Y W, et al. Effect of food waste compost on microbial population, soil enzyme activity and lettuce growth[J]. *Bioresour Technol*, 2004, 93(1):21-28.
- [19] 李梦寻,王冬梅,任远,等. 不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响[J]. *生态学报*,2018,38(5):1542-1549.
- [20] 米迎宾,杨劲松,姚荣江,等. 不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响[J]. *土壤学报*,2016,53(3):612-620.
- [21] 朱孟龙,赵兰坡,赵兴敏,等. 稻草和硫酸铝添加对苏打盐碱土活性有机碳及有机无机复合体的影响[J]. *水土保持学报*,2015,29(4):284-288.
- [22] 陶津,李云龙,周根国,等. 环保酵素对土壤理化性质及辣椒生长的影响[J]. *玉溪师范学院学报*,2017,33(4):35-40.
- [23] 蔡毅飞,唐敏. 环保酵素的发酵过程研究[J]. *科技资讯*,2017(14):230-230.
- [24] Leal L H, Temmink H, Zeeman G, et al. Comparison of three systems for biological greywater treatment [J]. *Water*, 2010(2):155-169.
- ~~~~~
- (上接第125页)
- [22] Scanlon B R, Longuevergne L, Long D. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA[J]. *Water Resources Research*, 2012,48(4):4520-4528.
- [23] Wada Y, van Beek L P H, van Kempen C M, et al. Global depletion of groundwater resources[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010,37(20):114-122.
- [24] Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006,33(8):1-4.
- [25] Moiwo J P, Lu Wenxin, Tao Fulu. GRACE, GLDAS and measured groundwater data products show water storage loss in Western Jilin, China[J]. *Water Science & Technology*, 2012,65(9):1606-1614.
- [26] Gao Hui, Yang Song. A severe drought event in northern China in winter 2008—2009 and the possible influences of La Nina and Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009,114(24):144-159.
- [27] 张铜会,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地玉米耗水规律初探[J]. *中国沙漠*,1999,19(S1):138-140.
- [28] 周磊,刘景辉,郝国成,等. 沙质土壤改良剂对科尔沁地区风沙土物理性质及玉米产量的影响[J]. *水土保持通报*,2014,34(5):44-48.
- [29] 黄志刚,肖焯,张国,等. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测[J]. *生态学报*,2017,37(7):2368-2381.