

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0091

刘芳芳,黄耀欢,姚华荣,等.基于GRACE的京津冀地下水储量变化时空演变格局[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):874-882. LIU F F, HUANG Y H, YAO H R, et al. Spatiotemporal evolution pattern of groundwater storage changes in Beijing-Tianjin-Hebei region based on GRACE[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 874-882. (in Chinese)

基于 GRACE 的京津冀地下水储量变化 时空演变格局

刘芳芳¹, 黄耀欢^{2,3}, 姚华荣⁴, 韩嘉福², 任红艳²

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 长安大学土地工程学院, 西安 710054)

摘要:基于2003—2019年GRACE陆地水储量变化数据和全球陆地水文模型(global land data assimilation system, GLDAS)数据反演京津冀地下水储量变化,运用时空分析方法对地下水等效水高变化进行时空演变特征分析。在空间变化上,整个京津冀地下水等效水高变化速率约为 -51.77 mm/a ,其中:北京市变化速率最低,约为 -38.15 mm/a ;天津市变化速率最高,约为 -62.85 mm/a ;河北省变化速率与区域平均变化水平相当,约为 -52.42 mm/a 。基于Sen Slope和Mann-Kendall非参数检验法分析得出西部、西南部和中部地区地下水等效水高下降趋势最明显,东北部下降趋势最小。在时间变化上,地下水等效水高变化具有一定的季节性规律:夏季变化速率最大,约为 -75.99 mm/a ;冬季变化速率最小,约为 -37.24 mm/a ;春秋两季的变化速率大致相同,分别为 -52.34 mm/a 和 -48.21 mm/a 。在影响因素分析中,人类活动是引起京津冀地区地下水等效水高变化的主要因素。研究结果可为科学掌握京津冀地下水储量时空变化规律提供数据支撑。

关键词:GRACE;地下水;GLDAS;时空格局;京津冀

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地下水是陆地储水量的重要组成部分^[1],也是人们生活和发展生产所依赖的重要资源^[2],地下水开采会造成地下水位下降、地面沉降等一系列生态环境问题^[3-4]。京津冀地区是我国重要的经济政治文化中心,同时也是我国重要的工农业生产基地,地下水资源对其发展至关重要,因此科学分析并理解京津冀地下水储量的时空演变格局对开展区域生态环境保护工作具有重要意义。

传统地下水变化监测主要依靠监测井进行^[5],但布点有限、成本高,同时由于地下水随地质条件不连续变化,点状监测井数据存在观测深度不够、空间不连续等问题^[6]。常规光学遥感和测高技术只能监

测地表及浅层土壤水状况,无法获得深层地下水信息^[7]。2002年3月,美德联合研制的重力反演与气候实验卫星(gravity recovery and climate experiment, GRACE)的发射为研究地下水储量变化开辟了新途径^[8-10],随着GRACE-FO数据的发布,GRACE陆地水储量已经覆盖了自2003年至今的全球数据,为地下水储量长时间序列空间格局变化研究提供了可能。GRACE陆地水储量变化数据已成为水文地质资料匮乏区的地下水文监测和评价的重要数据来源^[11],其基础主要是通过地表水、植被水和土壤水等水储量分量实现地下水的反演^[12]。近年来,基于全球陆地水文模型(global land data assimilation

收稿日期:2020-01-15 修回日期:2021-06-24 网络出版时间:2021-07-02

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210701.1836.002.html

基金项目:高分共性产品真实性检验关键技术研究及标准规范编制(21-Y20B01-9001-19/22);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA19040402);国家重点研发计划项目(2016YFC0401404)

作者简介:刘芳芳(1996—),女(回族),贵州毕节人,主要从事地理学研究。E-mail:liuff@chd.edu.cn

通信作者:黄耀欢(1982—),男,安徽黄山人,副研究员,博士,主要从事遥感与GIS应用研究。E-mail:huangyh@reis.ac.cn

system, GLDAS) 提供的土壤水、积雪水和冠层水等数据优势, 耦合 GRACE 和 GLDAS 水文模型的地下水反演进一步促进了宏观尺度地下水监测的发展, 如: Rodell 等^[13]利用 GRACE-GLDAS 分离了密西西比河流域地下水储量异常值, 结果显示在大于 90 万 km² 的范围上的监测结果要优于监测井所测数据; Vissa 等^[14]利用 GRACE 和 GLDAS 发现厄尔尼诺等短期气候扰动结束后地下水储量有明显的上升趋势; Natthachet 等^[15]利用 GRACE/GRACE-FO 数据同化评估资料稀缺地区水文变化引起的土地变形, 突出 GRACE 和 GRACE-FO 数据的优势; 罗志才等^[16]从 GRACE 水储量变化中扣除 GLDAS 的土壤水和积雪水反演得出黑河流域的地下水储量呈下降趋势; 谢小伟等^[17]耦合 GRACE 和 GLDAS 反演发现陕甘晋高原 2005—2014 年地下水储量自西向东递减速率依次增大。华北平原的地下水变化成为近几年的热点研究问题, 众多学者基于卫星数据开展了研究, 如: Feng 等^[18]利用 GRACE 数据, 结合水文模型和实测数据计算得出 2003—2010 年华北平原的地下水储量亏损速率约为 2.2 cm/a; Huang 等^[19]考虑到地下水浅层与深层分布的不同, 采用降尺度的方法将华北平原分为山前平原和中东部平原, 结果显示两个区域在 2003—2013 年地下水变化速率分别为 (-46.5 ± 6.8) mm/a 和 (-16.9 ± 1.9) mm/a; Gong 等^[20]主要研究地下水储量的长期趋势与地面沉降的关系; Zhao 等^[21]采用不同的 GRACE 产品分析华北地区 2004—2016

年及 2013—2016 年地下水的亏损速率, 结果表明 2013 年后地下水储量亏损速率加快。上述研究结果都表明华北地区水储量持续减少, 但是, 多数学者将重点放在整个华北地区的变化率上, 缺少从时空分析角度按行政区进行分析的研究。

本文在前人研究的基础上, 利用 GRACE 及 GRACE-FO 陆地水储量变化数据和 GLDAS 数据, 进行 2003—2019 年京津冀地下水储量变化估算, 并采用空间分析及时间序列分析法分析地下水储量变化的时空演变格局, 以期科学掌握京津冀地下水储量时空变化、开展生态环境恢复提供数据支撑, 同时对开展区域生态环境保护工作也具有重要意义。

1 研究区概况

京津冀研究区包括北京市、天津市和河北省下辖 11 个地级市, 总面积约 22 万 km², 见图 1。根据中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer) MODIS 数据分析, 发现占比最大的为农业用地类型, 气候类型为温带大陆性季风气候。同时, 历年水资源公报显示: 2003—2019 年年均降水量为 531.97 mm, 与多年平均降水量相当; 而地下水位整体下降, 2003 年北京和河北浅层地下水位平均埋藏深度分别为 18.33 m 和 13.96 m, 到 2019 年末, 平均埋藏深度约 22 m 和 18 m。随着工农业和经济的快速发展和人口数量的迅速增加, 京津冀地区地下水时空格局变化更加剧烈, 厘清其时空演变格局对地下水资源保护具有重要意义。



行政边界数据来源于资源环境与科学数据中心, DEM 数据来源于地理空间数据云的 ASTER GDEM 30 m 分辨率数据

图 1 京津冀地理位置

Fig. 1 Geographical location of Beijing-Tianjin-Hebei

2 数据与方法

2.1 数据

GRACE 卫星数据。采用 CSR 美国得克萨斯大学发布的 GRACE 时变重力场 RL06 Level-3 球谐数据产品 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search/>), 时间分辨率为 1 个月, 空间分辨率 1° , 时间跨度为 2003 年 1 月至 2019 年 12 月。RL06 版本采用改进的球谐系数截断到 60 阶的处理、高斯滤波和 SWENSON 法用以平滑由于观测、建模、球谐系数间的相关性及高阶项的截断等引起的误差。Level3 数据使用新版地心 1 阶校正系数、C20 和 C22 项系数进行替换调整、对 C30 项进行了校正等预处理, 数据以等效水高表示, 采用 ASCII / netCDF4 / GeoTIFF 3 种格式发布。为了与 GLDAS 数据统一格式, 在采用官方发布的尺度因子对 GRACE 及 GRACE-FO 数据进行信号恢复的基础上, 还进行了单位换算、裁剪、重采样等预处理。同时, 在进行时空分析时, 为保证数据时序连续性, 对 GRACE 缺失月份数据采用相邻 2 个月份的均值进行插补, 对 GRACE 和 GRACE-FO 之间缺失的 11 个月数据采用相邻两年的同一月份的均值进行插补。尽管上述 GRACE 陆地水储量数据在加利福尼亚中央山谷^[22]、英国伦敦市^[23]等小区域地下水变化研究中已有成功应用, 但 1° 空间分辨率栅格相对于京津冀行政边界尺度过大, 以此进行空间分析存在混合像元问题, 进而会影响后续分析精度。为此, 将每个 1° 栅格重采样为 100×100 个 0.01° 栅格, 重采样后栅格值为原始像元中的水储量变化值, 并以此作为陆地水储量变化数据源, 从而尽可能降低因 GRACE 数据分辨率问题对京津冀地下水储量的空间格局及其时间序列变化趋势分析结果的影响。

GLDAS 同化系统数据。GLDAS 是 NASA 哥达空间飞行中心和 NOAA 国家环境预测中心联合研究发布的全球陆地资料同化系统 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=GLDAS>), 有 4 种陆地表面模型驱动 (NOAH、CLSM、CLM、VIC)。采用 NASA 在 2020 年 4 月 9 日发布的 2003 年 1 月—2019 年 12 月数据。该 GLDAS 数据基于 NOAH 模型汇总地面观测资料和卫星数据, 可直接与 GRACE 及 GRACE-FO 数据进行耦合的水储量分量异常数据 (0~200 cm 土壤水、积雪和冠层水之和)。对 GLDAS 数据采用与 GRACE 数据相同的预处理方式, 时间和空间分辨率与 GRACE

及 GRACE-FO 的陆地总水储量变化数据一致。

2.2 研究方法

2.2.1 基于 GRACE 的地下水水量平衡

在通常情况下, GRACE 及 GRACE-FO 所表征的陆地水储量变化 (ΔW_L) 主要包括土壤含水量变化 (ΔW_{SO})、地表水储量变化 (ΔW_{SU})、积雪冰川水变化 (ΔW_{SI})、植被冠层水变化 (ΔW_V) 和地下水储量变化 (ΔW_G)。众多国内外学者^[24-28]的研究指出在非湿润区的非汛期年份, 相对于地下水储量变化和土壤含水量变化, 由地表水储量变化引起的陆地水储量变化较小可忽略。基于此假设, 构建的地下水储量变化水量平衡公式为

$$\Delta W_G = \Delta W_L - (\Delta W_{SO} + \Delta W_{SI} + \Delta W_V) \quad (1)$$

式中: 变量单位均为 mm, 其中: ΔW_L 表示陆地水储量变化, 由 GRACE 及 GRACE-FO 时变重力场模型中获得; ΔW_{SO} 表示土壤湿度含水量变化; ΔW_{SI} 表示积雪冰川水当量变化; ΔW_V 表示植被冠层含水量变化。这个变量从全球陆面数据同化系统 (GLDAS) 的 NOAH 模型中获得。

在此版本数据发布之前, 学者们进行地下水反演时主要是从 GLDAS 中提取陆面水储量 (包括 0~200 cm 的土壤水、积雪、冠层水等), 进而将陆面水储量转换成与 GRACE 陆地水储量变化一致的异常量再与 GRACE 进行耦合运算, 这在一定程度上引入了不确定性。本文采用的 GLDAS 数据 (ΔW_{SO} 、 ΔW_{SI} 和 ΔW_V) 是 TELLUS 处理发布的陆面水储量异常数据, 可直接结合 GRACE 及 GRACE-FO 陆地水储量变化数据进行地下水储量变化反演。

2.2.2 时间序列分析 Sen Slope 和 Mann-Kendall 检验法

采用 Sen 非参数方程^[29]估计地下水等效水高变化趋势斜率, 其中斜率一般取中值, 公式为

$$\beta = S_{\text{Median}} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, n; j>i; x_j$ 和 x_i 表示 j 与 i 时刻的每个格网的地下水等效水高变化值。使用趋势度 β 判断时间序列趋势的升降: 当 $\beta>0$ 时, 地下水等效水高变化时间序列呈上升趋势; 当 $\beta<0$ 时, 呈下降趋势^[30]。

在数据时间序列趋势分析中, Mann-Kendall 检验法^[31-32]常用来检测数据的长期变化趋势^[33]。在 M-K 检验中, 对任意待检序列 $X_t (t=1, 2, 3, \dots, n)$, n 为待检数据序列长度, 可根据式 (3) 定义统计量:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(X_j - X_k) \quad (3)$$

式中: X_j 和 X_k 表示时间相应年份数据; n 表示时间序列长度; $\text{Sgn}(X_j - X_k)$ 为符号函数; 当 $n \geq 10$ 时, 统计量 S 近似服从标准正态分布, 可根据式(4)构造标准化的检验统计量:

$$U = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\text{Var} = n(n-1)(2n+5)/18$, n 为时间序列长度。在本文中, 时间序列长度 $n=17$, 结合 Sen 斜率和检验统计量 U 来进行趋势检验, 检验中取显著水平 $\alpha = 0.05$, $U_{1-\alpha/2} = U_{0.975} = 1.96$ 。当 $\beta > 0$, $|U| > 1.96$ 时, 地下水等效水高变化时间序列呈显著上升趋势; 当 $\beta < 0$, $|U| > 1.96$ 时, 时间序列呈显著下降趋势。

3 结果与分析

3.1 地下水等效水高变化空间分析

(1) 各省市地下水等效水高变化。根据水量平衡公式(1), 利用京津冀地区 2003—2019 年月尺度 GRACE 及 GRACE-FO 陆地水储量变化数据及

GLDAS 土壤水、积雪水及植被冠层水等地表水储量变化数据对地下水进行反演(图 2), 结果以等效水高表示。2003—2019 年, 京津冀地区地下水等效水高变化速率约为 -51.77 mm/a , 其中: 北京市变化速率最小, 约为 -38.15 mm/a ; 天津市变化速率最大约为 -62.85 mm/a ; 河北省变化速率约为 -52.42 mm/a , 与区域平均水平相当。此外, 从变异性上看: 北京市地下水等效水高变化方差最小, 约为 $2\,773 \text{ mm}^2$, 变化值的波动范围最小; 天津市方差最大, 约为 $7\,912 \text{ mm}^2$, 其变化值波动较其他两省市大; 河北省方差约为 $4\,306 \text{ mm}^2$, 变化值波动范围与全区域变化值波动范围相近。需要说明的是, 京津冀行政单元的空间尺度比较小, 而 GRACE 的栅格分辨率粗, 本质上反演如此小区域的地下水等效水高变化其结果应该会含有一定误差。但在利用尺度因子进行信号恢复的同时, 还采用重采样方法对栅格进行细化, 从而尽可能降低因 GRACE 数据分辨率问题对京津冀地下水储量的空间格局及其时间序列变化趋势分析结果的影响, 研究结果基本上反映了该地区的地下水等效水高变化趋势, 具有一定的参考价值。

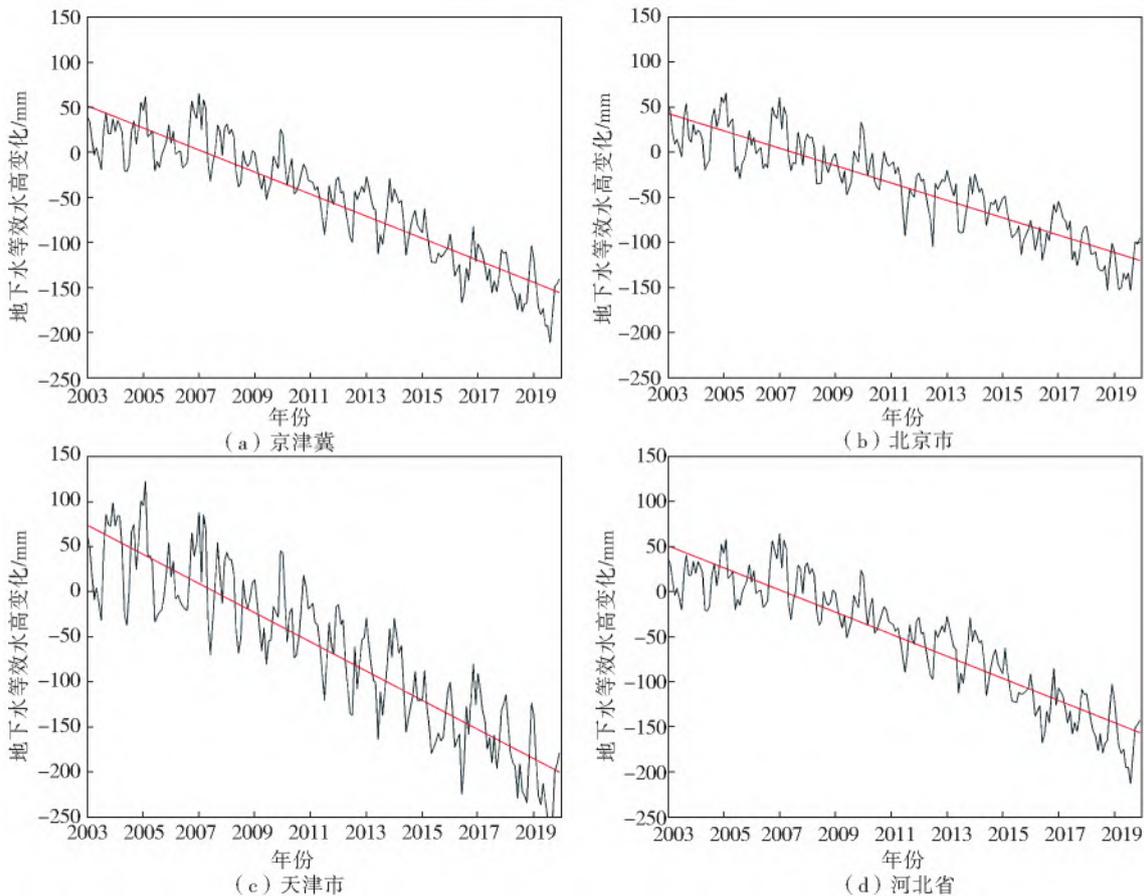


图 2 GRACE 反演地下水等效水高变化

Fig. 2 Groundwater equivalent height retrieved by GRACE

同时,基于 2003—2019 年水资源公报中的年尺度地下水资源量数据对重力卫星数据的反演结果进行验证,将 3 个省市的地下水资源量进行求均值处理。数据显示,2003 年全区地下水资源量约 155.45 亿 m^3 ,2019 年减少为 117.94 亿 m^3 ,变化率约为 -24.13%,这与本文基于 GRACE 及 GRACE-FO 所反演的地下水等效水高变化趋势大致相同,均显示在 2003—2019 年间京津冀地区地下水储量减少。

(2) 基于 Sen Slope 和 Mann-Kendall 的地下水储量空间变化趋势。基于 Sen Slope 和 Mann-Kendall 法分析 2003—2019 年京津冀地区地下水等效水高变化趋势(图 3),由式(2)、(3)和(4)逐栅格计算每个格网的 β 斜率和显著性 U 值,并通过置信水平 0.05 的检验,得出 $\beta < 0$, U 取值范围 $[-15, -3.7]$, $|U| > 1.96$,从蓝色过渡到红色表明地下水等效水高下降趋势越明显。在 2003—2019 年整个京津冀地区地下水等效水高持续下降,其中:以西部、西南部和中部地区地下水下降趋势最明显, U 值最低为 -15;东北部是整个京津冀地区地下水等效水高下降趋势最小的区域, U 值最低为 -5.56;北部、南部、东南部和西北部的变化趋势相对来说比较接近,但也都处于下降状态。下降趋势越明显的地区其地下水耗损量也越大;反之,下降趋势显著性越低的地方地下水耗损量也相对较小。

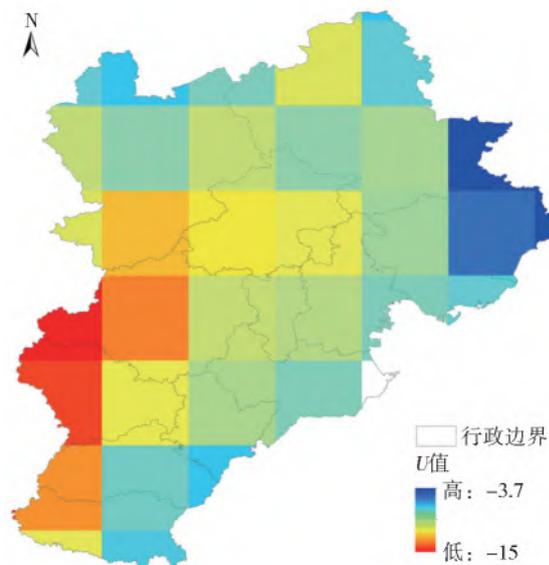


图 3 Sen+M-K 地下水储量变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the changing trend of Sen+M-K groundwater storage

3.2 地下水等效水高变化时间序列分析

为考察京津冀地下水等效水高变化在时间上的演变规律,基于重力卫星数据反演结果统计不同季节及各个月份在不同年份之间的箱线图(图 4)。表明

地下水等效水高变化具有一定的季节性规律,夏季地下水等效水高减少量多于其他 3 季,冬季变化速率最小,春秋两季变化速率大致相同。其中:夏季波动较其他 3 季大,可能是受夏季降水多、蒸发量大及其他不确定性因素的影响,变化速率约为 -75.99 mm/a ,这与夏季农作物生长对地下水需求量大于其他季节的状况一致;春秋两季地下水等效水高变化大致相同,变化速率分别为 -52.34 mm/a 和 -48.21 mm/a ,中位数和波动的上下限也大致在同一水平上;冬季地下水等效水高变化值波动范围小于其他 3 季,整体变化值大于其他季节的变化值,变化速率约为 -37.24 mm/a 。

对各年同一月份的地下水等效水高变化值进行统计的箱线图显示,多年中 12 个月的地下水等效水高变化值在一个相对稳定的范围内波动:地下水等效水高变化值在 6、7 月份普遍偏低,8 月份的下限值波动最大;12 月、1 月和 2 月变化值普遍高于其他月份,变化值的波动范围也小于其他月份;3、4、5 和 9、10、11 这 6 个月份的地下水等效水高变化值分布范围、波动区间大致相同。这与上文对四季的统计结果相似,说明京津冀地下水等效水高变化具有一定的季节性规律。

利用京津冀水资源公报的实测浅层地下水位数据对基于 GRACE 及 GRACE-FO 反演结果进行验证,数据显示京津冀地下水位起伏下降。其中:天津市浅层地下水位按变化率分析,2003 年相较于 2002 年增加了 0.79 m,2019 年相较于 2018 年下降了 0.02 m;河北省地下水埋深由 2003 年的 13.96 m 变为 2019 年的 18.18 m;北京地下水埋深由 2003 年的 18.33 m 变为 2019 年的 22.71 m,研究时段内地下水埋深最大值为 2015 年的 25.75 m。因此,从长时间尺度来看,GRACE 及 GRACE-FO 卫星数据反演结果与水资源公报中地下水位实测数据均显示京津冀地区地下水储量减少。

3.3 京津冀地下水储量变化影响因素分析

利用 2003—2019 年的 MODIS 数据计算得出各种土地利用类型年尺度的面积变化,并分析各种土地利用类型面积变化与重力卫星数据反演的地下水等效水高变化之间的关系,发现两者之间具有一定的相关性,其中,建设用地和林地的面积不断增加,农用地及草地灌丛面积减少,水域及未利用土地面积变化幅度较小。分析不同土地利用类型面积变化与地下水等效水高变化的 Pearson 相关关系,发现林地、建设用地和农业用地的面积变化与地下水等效水高变化呈负相关关系,相关系数最高为

-0.65,即随着林地、建设用地及农业用地面积增加,地下水等效水高变化值下降越明显。地下水等效水高变化与草地灌丛面积变化则呈正相关关系

(相关系数为 0.68,显著性为 0.004),草地具有涵养水分的功能,草本植物和灌丛植被吸水能力弱于林地和农作物,地下水等效水高变化幅度较小。

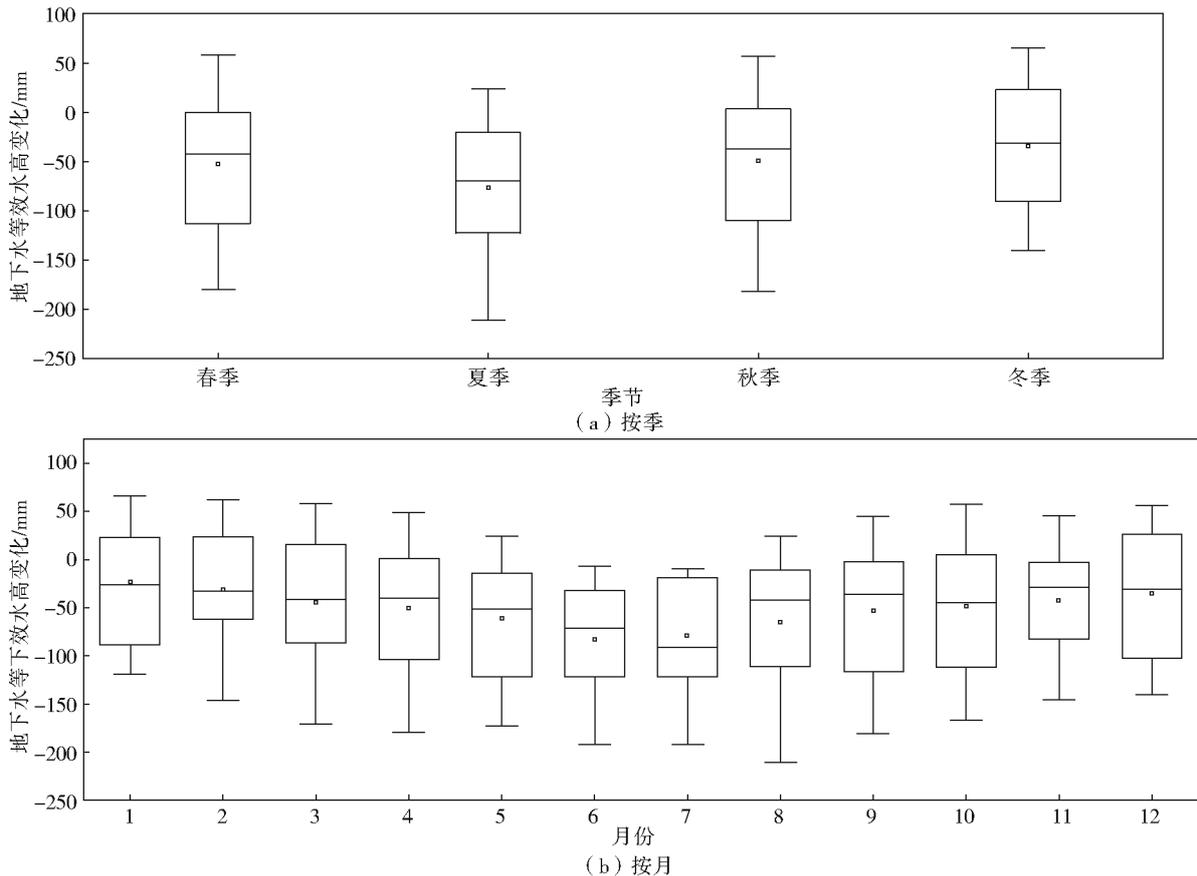


图4 季节及各月地下水储量变化箱线图

Fig. 4 Box diagram of seasonal and monthly changes of groundwater storage

统计数据显示,2003—2019年间降水量稳定保持在500 mm左右,上下浮动约为200 mm,与多年平均降水量相当,降水量最大为2012年的721 mm,最小为2014年的423 mm,说明在研究时段内,京津冀地区降水量基本无异常。此外,2003—2019年,京津冀地区人口逐渐增多,常住人口由9 236.7万人增加到11 307.4万人,城镇化率也在不断上升,其中:北京市的城镇化率由79.07%上升到86.6%;河北省由33.51%上升到57.62%;天津市城镇化率由73.45%上升到83.48%。

综上,在土地利用面积、人口数量及城镇化率等人类活动因素显著变化而降水量等自然因素变化不大的情况下,京津冀地区地下水储量仍波动下降,表明在京津冀地区人为因素对区域地下水等效水高变化的影响大于自然气象要素,人类活动可能是进一步导致京津冀地下水等效水高下降的重要因素之一。

4 结论

根据 GRACE 及 GRACE-FO 陆地水储量数据

及 GLDAS 数据反演了 2003—2019 年京津冀地区地下水储量变化,反演结果与水资源公报统计数据变化趋势大致相同,均显示地下水储量减少。结合土地利用数据、人口数据、降水数据等其他辅助数据并利用时空分析方法对地下水进行时空演变分析,得出以下结论:

(1)在空间变化上,京津冀地区地下水等效水高变化速率约为 -51.77 mm/a ,其中北京变化速率最低,约为 -38.15 mm/a ;天津市变化速率最高,约为 -62.85 mm/a ;河北省变化速率与区域变化速率相当,约为 -52.42 mm/a 。

(2)基于 Sen+M-K 法分析得出,西部、西南部和中部地区地下水等效水高下降趋势最明显,东北部下降趋势最小,北部、南部、东南部和西北部的变化趋势相对来说比较接近。

(3)在时间变化上,地下水等效水高变化具有一定的季节性规律:夏季地下水等效水高减少量多于其他3季,变化速率约为 -75.99 mm/a ;冬季变化速率最小,约为 -37.24 mm/a ;春秋两季变化速率

大致相同,分别为 -52.34 mm/a 和 -48.21 mm/a 。

(4)在影响因素中,京津冀地下水等效水高变化与林地、建设用地和农业用地的面积变化成负相关关系(相关系数最高为 -0.65)地下水等效水高变化与草地灌丛则成正相关关系(相关系数为 0.68 ,显著性为 0.004),结合降水数据得出人为要素对京津冀地区地下水等效水高变化的影响程度大于自然气象要素。

参考文献(References):

- [1] RODELL M, VELICOGNA I, FAMIGLIETTI J. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India [J]. *Nature*, 2009, 460, 999-1002. DOI: 10. 1038/nature08238.
- [2] HSU Y J, FU Y, ROLAND B, et. al. Assessing seasonal and interannual water storage variations in Taiwan using geodetic and hydrological data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 550, 116532. DOI: 10. 1016/j. epsl. 2020. 116532.
- [3] GAO F, WANG H X, LIU C M. Long-term assessment of groundwater resources carrying capacity using GRACE data and Budyko model [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588, 125042, ISSN 0022-1694. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2020. 125042.
- [4] 涂梦昭, 刘志锋, 何春阳, 等. 基于 GRACE 卫星数据的中国地下水储量监测进展 [J]. *地球科学进展*, 2020, 35 (6): 643-656. (TU M Z, LIU Z F, HE C Y, et. al. Research progress of groundwater storage changes monitoring in China based on GRACE satellite data [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35 (6): 643-656. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2020. 049.
- [5] MICHAEL J, MABBIE E, ROSS C, et. al. The contribution of citizen science in managing and monitoring groundwater systems impacted by coal seam gas production: an example from the Surat basin in Australia's Great Artesian basin [J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28 (1): 439-459. DOI: 10. 1007/s10040-019-02050-8.
- [6] 任永强, 潘云, 宫辉力. 海河流域地下水储量空间变化趋势分析 [J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 35 (2): 89-98. (REN Y Q, PAN Y, GONG H L. Haihe basin groundwater reserves space trend analysis [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 35 (2): 89-98. (in Chinese)) DOI: 10. 19789/j. 1004-9398. 2014. 02. 018.
- [7] 阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明. 地下水遥感监测研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2004 (1): 184-188. (ABDUWASIT G, QIN Q M. Overview on methods and theories of remote sensing monitoring and exploration of groundwater [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004 (1): 184-188. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1002-6819. 2004. 01. 044.
- [8] RODELL M, FAMIGLIETTI J S. The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using GRACE: The high plains aquifer, central US [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 263 (1/4): 245-256. DOI: 10. 1016/S0022-1694(02)00060-4.
- [9] 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. (FENG W, WANG C Q, MU D P, et. al. Spatial groundwater storage variations in the north China plain from GRACE with spatial constraints [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60 (5): 1630-1642. (in Chinese)) DOI: 10. 6038/cjg20170502.
- [10] NIGATU Z M, FAN D M, YOU W. Hydroclimatic extremes evaluation using GRACE/GRACE-FO and multidecadal climatic variables over the Nile River basin [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13 (4): 651. DOI: 10. 3390/RS13040651.
- [11] HENRY C M, ALLEN D M, HUANG J. Groundwater storage variability and annual recharge using well-hydrograph and GRACE satellite data [J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19 (4): 741-755. DOI: 10. 1007/s10040-011-0724-3.
- [12] SANAZ M. Assessment of water storage change using GRACE and GLDAS [J]. *Water Resources Management*, 2020, 34 (2): 685-697. DOI: 10. 1007/s11269-019-02468-5.
- [13] RODELL M, CHEN J, KATO H, et al. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE [J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15 (1): 159-166. DOI: 10. 1007/s10040-006-0103-7.
- [14] VISSA N K, ANANDH P C, BEHERA M M, et. al. ENSO-induced groundwater changes in India derived from GRACE and GLDAS [J]. *Journal of Earth System Science*, 2019, 128, 115. DOI: 10. 1007/s12040-019-1148-z.
- [15] NATTHACHET T, MICHAL Š. The assessment of hydrologic- and flood-induced land deformation in data-sparse regions using GRACE/GRACE-FO data assimilation [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 235. DOI: 10. 3390/RS13020235.
- [16] 罗志才, 李琼, 钟波. 利用 GRACE 时变重力场反演黑河流域水储量变化 [J]. *测绘学报*, 2012, 41 (5): 676-681. (LUO Z C, LI Q, ZHONG B. Water storage variations in Heihe River basin recovered from GRACE temporal gravity field [J]. *Journal of Surveying and Mapping*, 2012, 41 (5): 676-681. (in Chinese)) DOI:

- CNKI;SUN;CHXB, 0. 2012-05-011.
- [17] 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. (XIE X W, XU C J, GONG Z, et. al. Groundwater storage changes in Shan-Gan-Jin Plateau derived from GRACE [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018 (1): 133-137. (in Chinese)) DOI: 10. 13474/j. cnki. 11-2246. 2018. 0026.
- [18] FENG W, ZHONG M, 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.
- [19] HUANG Z, PAN Y, GONG H, et al. Subregional-scale groundwater depletion detected by GRACE for both shallow and deep aquifers in north China plain[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(6): 1791-1799.
- [20] GONG H, PAN Y, ZHENG L, et al. Long-term groundwater storage changes and land subsidence development in the north China plain (1971-2015) [J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1417-1427.
- [21] ZHAO Q, ZHANG B, YAO Y B, et al. Geodetic and hydrological measurements reveal the recent acceleration of groundwater depletion in north China plain [J]. Journal of Hydrology, 2019(575): 1065-1072.
- [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, 2015, 48(4): 4520. DOI: 10. 1029/2011WR011312.
- [23] AGARWAL V, KUMAR A, GOMES R L, et al. Monitoring of ground movement and groundwater changes in London using InSAR and GRACE[J]. Applied Sciences, 2020, 10(23): 8599 (Advances in Ground Deformation Monitoring). DOI: 10. 3390/app10238599.
- [24] RODELL M, CHEN J L, KATO H, et. al. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE[J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15(1): 159-166. DOI: 10. 1007/s10040-006-0103-7.
- [25] GIL S, BRIDGET R. S, RODELL M. Comparison of seasonal terrestrial water storage variations from GRACE with groundwater-level measurements from the High Plains Aquifer (USA)[J]. John Wiley & Sons, Ltd, 2007, 34(14): 1-5. DOI: 10. 1029/2007GL030139.
- [26] YE H J F, SWENSON S C, FASMI GLIETTI 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(12), W12203. DOI: 10. 1029/2006WR005374.
- [27] 冉全, 潘云, 王一如, 等. GRACE 卫星数据在海河流域地下水年开采量估算中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2013(2): 42-46. (RAN Q, PAN Y, WANG Y R, et. al. Estimation of annual groundwater exploitation in Haihe River basin by use of GRACE satellite data[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013(2): 42-46. DOI: 10. 3880/j. issn. 10067647. 2013. 02. 009.
- [28] SHUANG Y, WANG Q, SUN W. Basin mass dynamic changes in China from GRACE based on a multibasin inversion method[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2016, 121(5): 3782-3803. DOI: 10. 1002/2015JB012608.
- [29] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63, 1379-1389.
- [30] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global and Planetary Change, 2013, 100: 172-182. DOI: 10. 1016/j. gloplacha. 2012. 10. 014.
- [31] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [32] KENDALL M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990, 25(1): 86-91.
- [33] WANG Y F, XU Y P, TABARI H, et. al. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta, eastern China[J]. Atmospheric Research, 2020, 231: 104673. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2019. 104673.

Spatiotemporal evolution pattern of groundwater storage changes in Beijing-Tianjin-Hebei region based on GRACE

LIU Fangfang¹, HUANG Yaohuan^{2,3}, YAO Huarong⁴, HAN Jiafu², REN Hongyan²

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100049, China; 4. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Groundwater is significant for an important political, economic and cultural center (Beijing-Tianjin-Hebei) in China. Therefore, scientifically analyzing the spatiotemporal pattern of groundwater storage is fundamental research in the Beijing-Tianjin-Hebei region. However, there are some shortcomings in previous research, such as the limited locations of groundwater

wells and the representation of in-situ data in a single geological condition. In the 21st century, the emerging GRACE satellite data, which is subject to little geological conditions, is applied in measuring water storage spatial continuity.

Herein, the GRACE-based terrestrial water storage anomalies and global land data assimilation system (GLDAS) are used to retrieve the groundwater storage in the Beijing-Tianjin-Hebei region, and Sen's slope and Mann-Kendall time series test are applied to analyze the spatiotemporal variations of groundwater.

It is found that the changing rate of groundwater is about -51.77 mm/a equivalent height of water in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2003 to 2019. Zonal statistics analysis with provincial administrative units showed that the depletion of groundwater in Beijing city has a minimum rate of -38.15 mm/a. Tianjin city has a maximum rate of -62.85 mm/a, and in Hebei Province, the rate of change is equivalent to the regional average rate of change with about -52.42 mm/a. The annual average groundwater storage of the National Bureau of Statistics was used to evaluate the GRACE-based retrieval result. It is also found that the groundwater storage has decreased about 375 million cubic meters from 2003 to 2019 in the entire region. Furthermore, the depletion of groundwater is significant in the western, southwestern, and central regions, but the depletion of groundwater is slight. In addition, the change of groundwater storage has some seasonal trend based on time-series analysis, the reduction of groundwater storage in summer is more than that in other seasons, with a mean rate of -75.99 mm/a, while the rate is the smallest in winter with about -37.24 mm/a equivalent height of water. The rate of change is similar in spring and autumn with a value of about -52.34 mm/a and -48.21 mm/a equivalent height of the water, respectively. According to the analysis of the change of groundwater storage in the same month of each year, it is found that the change value of groundwater storage fluctuated within a relatively stable range in the 12 months of the years, and the change value was generally low in June and July. The minimum in August, while December, January, and February are generally higher than that in other months, and the fluctuation range of the change is also smaller than that in other months. There are six months (March, April, May, September, October, November) when the distribution range and fluctuation range of the changes in groundwater storage are similar. When analyzing the impact factors, the groundwater storage is negatively correlated with the area changes of forest land, construction land, and agricultural land, with the highest correlation coefficient of -0.65 . While groundwater storage and grassland shrubs are positively correlated (correlation coefficient is 0.68 , significant 0.004). Based on the analysis combining with precipitation data, it is found that anthropogenic factor has a greater impact on the groundwater storage than natural meteorological factor.

The results are roughly the same as the statistical data of the Water Resources Bulletin, which both show that groundwater storage has decreased. Combining groundwater retrieval results with land use data, population data, precipitation data, and other auxiliary data, the spatiotemporal analysis methods are applied to analyze the spatiotemporal evolution pattern of groundwater, and it is concluded that the changing rate of groundwater storage of Beijing-Tianjin-Hebei is about -51.77 mm/a equivalent height of water, and the lowest rate of change about -38.15 mm/a in Beijing city and the highest rate of change about -62.85 mm/a in Tianjin city. The rate of change in Hebei Province is about -52.42 mm/a, which is equivalent to that of regional average change. Based on the Sen's slope and Mann-Kendall analysis, groundwater storage has a significant, negative trend in the western, southwestern, and central regions, and the minimum trend of depletion is present in the northeast. Time-series analysis showed that the changes in groundwater storage are seasonal and the impact factor analysis shown that the changes in groundwater storage in Beijing-Tianjin-Hebei are negatively correlated with area changes of forest land, construction land, and agricultural land, with the highest correlation coefficient value of -0.65 . While the groundwater storage and grassland shrubs are positively correlated (the correlation coefficient is 0.68 , the significance is 0.004). Based on the analysis combining with precipitation data, it is found that anthropogenic factor has a significant impact on the groundwater storage of Beijing-Tianjin-Hebei than natural meteorological factor. The research has a significance for protecting water safety and the ecological environment of the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Key words: GRACE; groundwater; GLDAS; spatiotemporal pattern; Beijing-Tianjin-Hebei