

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230201

基于 GWR 模型的海河流域地下水储量降尺度研究

黄上富^{1,2a}, 段光耀¹, 和继军^{2b}, 吴霞¹, 于帅¹

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 首都师范大学 a. 资源环境与旅游学院; b. 初等教育学院, 北京 100048)

摘要: 利用 GRACE 重力卫星数据联合 GLDAS 数据反演可得到地下水储量变化, 能够在大尺度范围监测研究区域内的地下水储量变化, 但得到的数据空间分辨率仅有 0.25° , 在小尺度范围内难以应用。基于 GRACE 陆地水储量及 GLDAS 浅层地表水储量与降水、NDVI 之间的空间关系, 提出一种基于地理加权回归模型 (GWR 模型) 的地下水储量变化的降尺度方法, 将地下水储量空间分辨率降尺度到 1 km。结果表明, GWR 模型降尺度方法成功应用于海河流域地区, 降尺度后的地下水储量数据变化与 46 个验证点实测地下水位数据的相关系数均大于 0.6, 模拟结果合理可靠。进而利用降尺度结果分析了海河流域与北京平原的地下水储量的时空变化特征, 结果与现有数据高度吻合, 表明基于 GWR 模型的降尺度方法能有效提高地下水储量变化数据的空间分辨率。

关键词: GRACE; GLDAS; 地下水储量变化; GWR 降尺度; 水资源监测

中图分类号: TV211.1⁺2; P332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0039-04

1 概况

海河流域面积 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国总面积的 3.3%, 包括华北平原地区, 华北平原是我国最主要的粮食生产地之一, 粮食产量占全国的 11%, 主要作物小麦和玉米的产量分别占全国小麦、玉米产量的 26%、18%^[1], 因此对淡水的需求量很大。然而华北平原的水资源量仅占全国水资源量的 6%, 人均水资源量只有全国的 23%, 地下水供水约占总用水量的 70%^[2]。海河流域在过去的一个世纪里曾发生多次干旱, 造成巨大的经济损失, 严重制约了该地区的社会经济发展。对此, FENG W 等^[3]利用 GRACE 观测 2003~2010 年华北地区地下水消耗速率为 $2.2 \pm 0.3 \text{ cm/a}$; GUO Y 等^[4]利用 GRACE 及 GRACE-FO 卫星数据计算出海河流域地下水 2003~2020 年期间平均损耗率为 1.88 cm/a 。然而, 由于 GRACE 数据分辨率不高, 现有研究仅监测到大范围地下水损耗情况^[5], 缺少详细区域地下水储量变化信息, 难以合理预测区域内地下水储量变化, 因此有

必要对地下水储量变化数据进行降尺度, 以细致探究详细区域内的地下水损失情况。传统机器学习模型 (ANN 和 RF) 降尺度方法算法复杂, 而单一线性回归模型 (线性和非线性回归) 降尺度则性能不足, 相比之下地理加权回归 (GWR) 模型性能更好。因此, 本文提出了一种基于 GWR 模型的 GRACE 降尺度方案来监测地下水变化情况, 以期地下水资源协调统一管理相关决策制定提供理论支持, 以推动区域水环境长期可持续发展。

2 数据与方法

2.1 GRACE、GLDAS 数据

采用 CSR 发布的 mascon 数据 (<http://www2.csr.utexas.edu/grace>), 空间分辨率为 0.25° , 时间分辨率为一个月。选用 2003~2016 年共 168 个月的 GRACE 数据, 对于部分月份缺失的 GRACE 数据, 采用线性插值法对其填充^[6]。采用 GLDAS-2.1 Noah 每月模型, 该模型包含全球降雨量、水分蒸发量、地表径流、地下径流、土壤湿度、地表积雪分布及温度和热流分布等数据 (地

收稿日期: 2023-02-15, 修回日期: 2023-03-15

基金项目: 北京卓越青年科学家项目 (BJJWZYJH01201910028032)

作者简介: 黄上富 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, E-mail: FU278148928@163.com

通讯作者: 段光耀 (1986-), 男, 博士、高级工程师、硕导, 研究方向为遥感与地理信息应用、水资源系统与可持续利用, E-mail: B339@cnu.edu.cn

球科学数据系统 <https://search.earthdata.nasa.gov/>),空间分辨率与 GRACE 保持一致为 0.25° 。

2.2 降水、NDVI 数据

降水数据取自“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn)的中国范围内 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901~2020 年)^[7],数据空间分辨率为 1 km,时间分辨率为一个月。NDVI 数据来源于资源环境科学数据注册与出版系统出版的中国月度植被指数(NDVI)空间分布数据集^[8],该数据集的空间分辨率为 1 km,时间分辨率为一个月。降水、NDVI 数据均选用 2003~2016 年共 168 个月的数据。

2.3 地下水位数据

地下水位数据取自《中国地质环境监测地下水位年鉴》^[9],该数据由人工实测获得。监测井分布见图 1,共 46 个监测点位。其中包括潜水、潜水—承压水、微承压水、承压水、基岩水及岩溶裂隙水。在同一监测点位存在不同层位的地下水时将不同层位的水位变化相加视为该点位的地下水位变化总量。通过观测地下水位数据异常可得地下水储量异常情况,并通过其对 GRACE 反演得到的地下水储量异常数据进行精度验证。

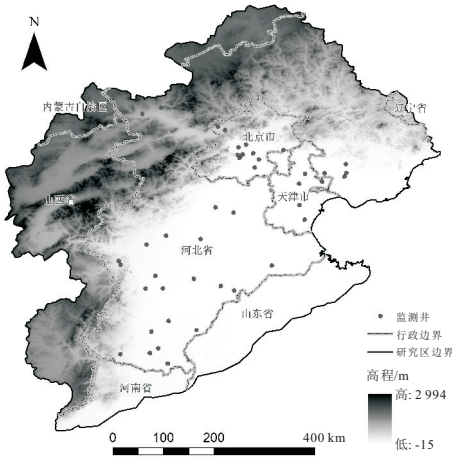


图 1 研究区及监测井分布点

Fig. 1 Location of the study area and groundwater well

2.4 降尺度方法

2.4.1 GWR 模型原理

地理加权回归是由 BRUNSDON C 等^[10]提出的一种用于量化空间异质性的局部参数估计方法,该模型对传统的回归模型进行扩展,通过估算每一位置的因变量与解释变量的参数来建立回归模型:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{i=1}^n \beta_i(u_i, v_i) X_{it} + \varepsilon(u_i, v_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, y_i 为第 i 个样本点的原尺度 GRACE、GLDAS 数据,作为因变量,共有 n 个点;

$\beta_0(u_i, v_i)$ 为第 i 个 GRACE、GLDAS 数据点的常数项回归参数; X_{it} 为第 t 个自变量的第 i 个点的观测值; $\beta_i(u_i, v_i)$ 为第 t 个影响因子对第 i 个样本点的线性回归参数; $\varepsilon(u_i, v_i)$ 为模型在第 i 个点的样本点所计算出的残差值。

2.4.2 数据降尺度

利用 GRACE 数据和降水、NDVI 数据建立地理加权回归模型,实现 GRACE 数据的降尺度,同理可得 GLDAS 的降尺度数据,两者相减后得到降尺度的 GWS 数据,具体过程为:①将 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的降水及 NDVI 数据的分辨率重采样至 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,将数据分为 1 km 分辨率数据组与 0.25° 分辨率数据组;②将 0.25° 分辨率的 GRACE、GLDAS 数据作为模型因变量, 0.25° 的降水及 NDVI 数据作为模型解释变量,建立 GWR 模型,对回归模型解算得到 GWR 模型各解释变量的常数项回归参数、线性回归参数及残差值;③将各变量的常数项回归参数、线性回归参数用普通克里金插值为 1 km 栅格,并将残差值用反距离权重法插值得到 1 km 的栅格;④基于 GWR 模型,将上一步得到的 1 km 栅格进行模型回代,得到空间分辨率为 1 km 的 GRACE 降尺度数据,同理可得到 GLDAS 降尺度数据。

2.4.3 降尺度评价指标

以原尺度的 GWS 作为数据的“真实值”,将降尺度的 GWS 值与原尺度的 TWS 值进行比较,包括 Pearson 相关系数 (R)、均方根误差 (R_{RMSE})、相对误差 (B_{BIAS}) 及平均绝对偏差 (M_{MAE}) 4 个评价指标。 R 估计了原尺度 GWS 值和降尺度 GWS 值之间的相关性,相关系数 R 越高表明相关性越大; R_{RMSE} 衡量了原尺度 GWS 值与降尺度 GWS 值之间的整体误差水平; B_{BIAS} 反映了原尺度 GWS 值与降尺度 GWS 值的偏离尺度, B_{BIAS} 越接近 0 则表明模型精度越高; M_{MAE} 则评定误差的实际情况。

3 降尺度结果

3.1 降尺度结果

对 2003~2016 年的 GRACE、GLDAS 数据求得原始尺度的 GWS 数据,再加上降水、NDVI 数据通过 GWR 模型得到降尺度的 GWS 数据。降尺度效果见图 2、3。由图 2 可知,降尺度前后 GWS 数据在空间分布上具有相同趋势,降尺度后的 GWS 在细节上可以显示出更好的效果。由图 3 可知,原尺度 GWS 数据与降尺度后的 GWS 数

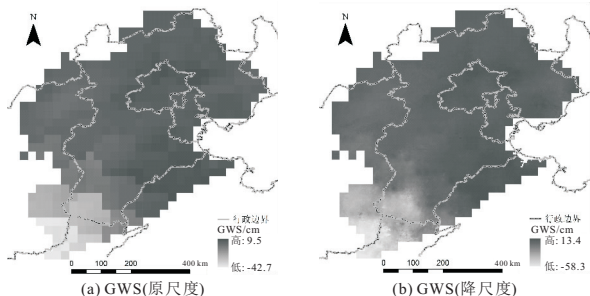


图 2 2003 年 1 月 GWS 降尺度前后对比

Fig. 2 Comparison before and after GWS downscaling in January 2003

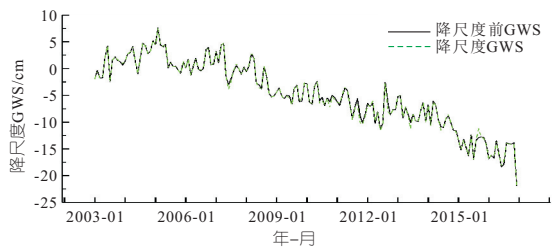


图 3 2003~2016 年海河流域 GWS 时间序列对比

Fig. 3 Comparison of GWS time series in Haihe River Basin from 2003 to 2016

River Basin from 2003 to 2016

据均呈下降趋势,且下降速率相同,为 1.382 ± 0.005 cm/a,将原尺度的 GWS 时间序列与降尺度后的 GWS 时间序列进行对比,证实了降尺度后的 GWS 数据保持了原始数据的准确性。

图 4 为原尺度 GWS 与降尺度 GWS 数据之间的对比, x 轴为原尺度的 GWS 数据, y 轴为降尺度的 GWS 数据。由图 4 可知,降尺度模型的 R 值为 0.999, B_{BIAS} 值为 0.318, R_{RMSE} 为 0.003 cm, M_{MAE} 为 0.164 cm。可见降尺度前后 GWS 的趋势变化一致($R=0.999$),说明 GWR 降尺度模型可在不丢失重要信息的情况下用于 GWS 的降尺度。

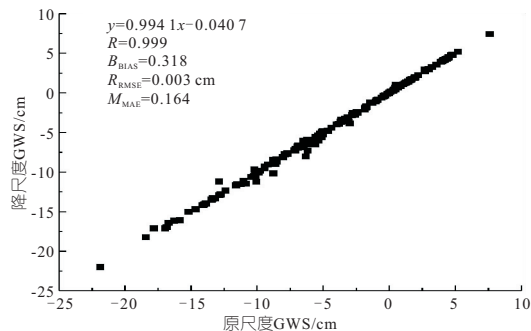


图 4 降尺度模型精度估计

Fig. 4 Accuracy estimation of downscaling model

3.2 降尺度结果验证

选取 46 口监测井的地下水埋深数据,将其与原尺度 GWS 数据及降尺度 GWS 数据进行对比验证,用以评价降尺度模型在空间和时间上的性能。将监测井数据叠加在 GWS 数据上,选取有观测井数据的降尺度 GWS 像元进行验证分析,检验监测井数据与 GWS 降尺度前后的相关系数 (R) (图 5)。图 5 显示,绝大多数 GWS 数据降尺度后与监测井相关系数 R 值比降尺度前高,降尺度前相关系数 R 值均值为 0.61,降尺度后相关系数 R 值均值为 0.63,表明该降尺度后的 GWS 数据相比降尺度前数据精度明显提升。

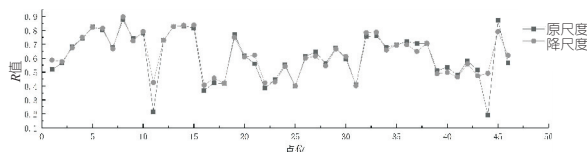


图 5 降尺度前后 R 值

Fig. 5 R value before and after downscaling

4 降尺度数据应用

图 6 为降尺度的 GWS 数据在海河流域上

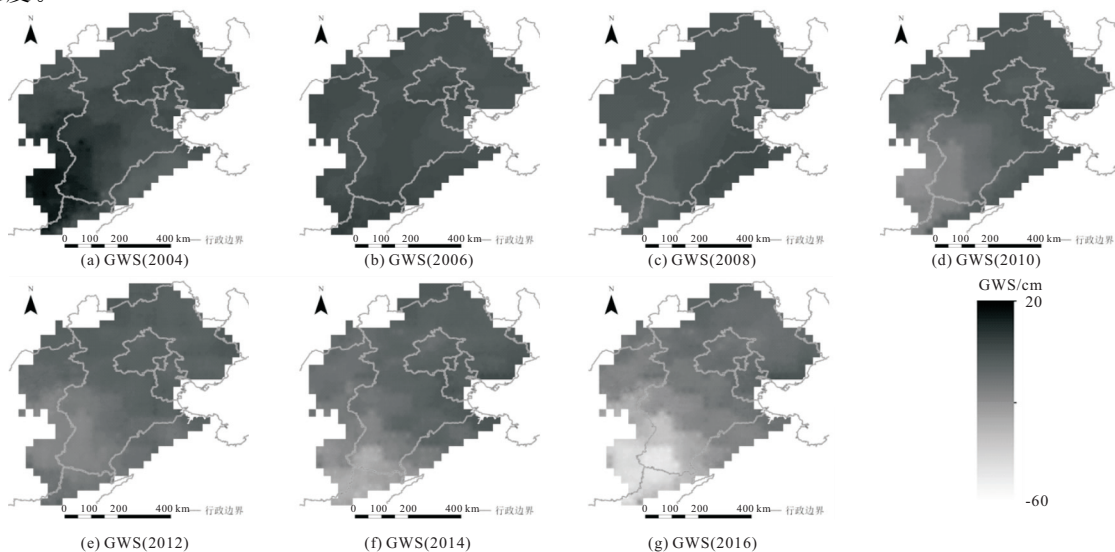


图 6 降尺度 GWS 在海河流域的时空分布

Fig. 6 Spatial and temporal distribution of downscaled GWS in Haihe River Basin

2003~2016 年的时空分布特征,从大尺度区域上看,海河流域地下水在 2003~2016 年大面积减少,且在 2014 年之后减少明显加剧,这与 GUO Y 等^[4]的研究结果相符。在空间分布上,海河流域南部地下水减少明显高于北部,这可能是由农业用水造成。农业灌溉用水除少部分使用地表水外,主要通过开采地下水获取,这会造成地下水超采从而导致地下水资源减少。

通过 GWR 模型降尺度,得到分辨率为 1 km 的海河流域地下水储量变化数据,可深入研究小区域内地下水状况。以海河流域内的北京平原区为例,图 7 为北京市平原区 2003~2016 年间的地下水储量变化过程,可以看到北京平原区地下水储量于 2003~2016 年逐渐下降,平均变化量为 -0.785 cm/a,这与刘芳芳等^[11]的研究结论一致。全年地下水储量等效水高在 2016 年达到最低值,低于 2004~2009 年间平均值 9.16 cm。得到的数据可用于北京平原区的干旱监测。

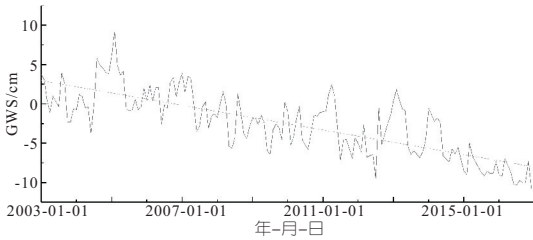


图 7 2003~2016 年北京市 GWS 时序变化
Fig. 7 Temporal changes of GWS in Beijing from 2003 to 2016

北京历史上经历过多次连续干旱,如 1999~2011 年的连续干旱期,由图 8 可知,2011 年干旱期结束时北京平原全区的地下水储量等效水高均为下降状态,最高可达 4.3 cm 以上,其中以北京平原冲洪积扇顶部地区及山前地区的地下水降低量最大,且这些地区地下水储量在干旱期间降低速率也快于其他地区,这与王丽亚等^[12]的研究结论一致。连续干旱导致北京平原区地下水自然补给量降低,同时导致地表水供给不足而加大开采地下水,进一步导致了地下水储量降低。干旱期

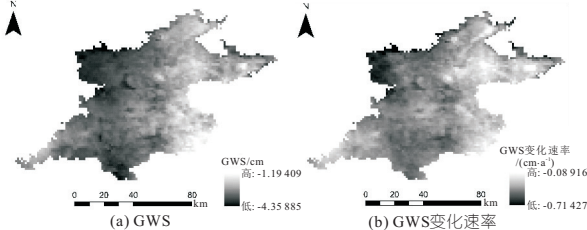


图 8 北京平原区 2011 年 GWS 及 2003~2011 年间 GWS 变化速率

Fig. 8 Beijing Plain 2011 GWS and the change rate of GWS from 2003 to 2011

后地下水储量持续降低的主要原因是随着人口增加及人们生活水平的提高,用水需求逐年上升。加上连续干旱期间,北京城区河流上游用水量也在增加,导致进入北京的水大幅减少。只能通过超采地下水以维持用水需求,从而导致地下水储量持续降低。

监测和早期预警是干旱管理中的重要组成部分,而基于 GRACE 的地下水储量变化监测便可作为监测成果之一,在获取更高分辨率的地下水储量变化情况基础上,可更加详细地分析小区域内的水储量变化和干旱时空变化特征,更好地监测区域内的地下水储量变化情况,做好预防干旱灾害的相关工作。

5 结论

- a. 提出了一种基于 GWR 模型的地下水储量变化降尺度方法,该方法易实现的同时提高了地下水储量变化监测精度,结果与实测数据相关性高。有助于研究尺度较小的区域内的地下水储量变化特征,对地下水变化监测具有重要意义。
- b. 降尺度过程中未考虑人类活动对地下水储量变化的影响,可能会导致降尺度数据与实测数据不一致,需在未来研究中进一步改善。

参考文献:

[1] 裴宏伟,沈彦俊,刘昌明. 华北平原典型农田氮素与水分循环[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 283-296.

[2] QIN H, CAO G, KRISTENSEN M, et al. Integrated hydrological modeling of the North China Plain and implications for sustainable water management[J]. Hydrology and earth system sciences, 2013, 17(10): 3759-3778.

[3] 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.

[4] GUO Y, GAN F, YAN B, et al. Evaluation of groundwater storage depletion using GRACE/GRACE follow-on data with land surface models and its driving factors in Haihe River Basin, China [J]. Sustainability, 2022, 14(1108): 1108.

[5] 王洁,张建梅,宁少尉,等. 基于 GRACE 重力卫星云南陆地水储量变化的降尺度分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 1-5.

[6] LONG D, YANG Y, WADA Y, et al. Deriving scaling factors using a global hydrological model to restore GRACE total water storage changes for China's Yangtze River Basin[J]. Remote sensing of environment, 2015, 168: 177-193.

加强沿线水域研究和防护。

参考文献:

[1] 栾华龙,刘同宦,丁平兴. 长江口河段近期冲淤演变过程及未来趋势预测[J]. 工程科学与技术,2019,51(2),21-27.

[2] 郭兴杰,王寒梅,史玉金,等. 近年来横沙东滩围垦

区前沿地形演化规律及驱动因素分析[J]. 海洋学报,2019,41(11):142-149.

[3] 曹帅. 横沙东滩圈围工程对周边水环境影响的数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.

[4] 路川藤,罗小峰,徐群,等. 基于非结构网格的长江口横沙东滩新陆域数值模拟[J]. 水利水电技术,2017,48(9):72-76,125.

Numerical Simulation Study on Influence of Hengsha Dongtan (Phase 6-8) Project on the Yangtze River Estuary

SONG Rong-hua, TANG Jian-hua

(Shanghai Branch of Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200439, China)

Abstract: To analyze the impact of the construction of the Hengsha Dongtan (Phase 6-8) project on the Yangtze River Estuary, a two-dimensional tidal flow model was established using Delft3D, and tidal level and velocity calibration verification was conducted using existing hydrological data from 2008 and 2016. Based on the hydrological conditions in normal and flood years, the hydrological conditions, such as tidal volume, tidal level, and flow field in the main tributaries of the Yangtze River Estuary before and after the implementation of the Hengsha Dongtan Phase 6-8 Project were simulated. The results show that under two flow conditions, the construction of the Hengsha Dongtan Phase 6-8 project has a relatively small impact on the rising and falling tide flows of the main tributaries of the Yangtze River Estuary. The variation of high and low tide levels in the Yangtze River Estuary does not exceed 0.01 m, and the variation of high and low tide levels in the water area where the project is located does not exceed 0.02 m; The project has no significant adverse impact on the large-scale flow field structure of the Yangtze River Estuary. The rising tide velocity of the Beigang Waterway and Beigang Beisha Jiahong has decreased, with a maximum decrease of 0.03 m/s in Beigang Waterway and 0.02 m/s in Beigang Beisha Jiahong. The rising tide velocity of the Hengsha Channel and the North Channel of the Yangtze River Estuary has remained basically unchanged. Under the current riverbed terrain and engineering boundary conditions (all of the Hengsha East Beach project has been completed), there is a northwest southeast channel on the northeast side of the beach surface. The northern edge of the eighth phase project and the northern edge of the downstream sand body have a high ebb tide velocity, with a maximum velocity of 1.5 m/s or above, which is not conducive to the stability of the Hengsha East Beach regulation project.

Key words: Hengsha Dongtan; the Yangtze River Estuary; numerical simulation; engineering construction

(上接第 42 页)

[7] 彭守璋. 中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集 (1901-2020)[M]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2020.

[8] 徐新良. 中国年度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集[M]. 北京: 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, 2018.

[9] 中国地质环境监测院. 中国地质环境监测地下水位年鉴[M]. 北京: 中国大地出版社, 2005-2016.

[10] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARL-

TON M. Geographically weighted regression[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series D(the statistician), 1998, 47(3). DOI: 10.1111/1467-9884.00145.

[11] 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.

[12] 王丽亚,郭海朋. 连续干旱对北京平原区地下水的影响[J]. 水文地质工程地质,2015,42(1):1-6.

Downscaling of Groundwater Storage Change in Haihe River Basin Based on GWR Model

HUANG Shang-fu^{1,2a}, DUAN Guang-yao¹, HE Ji-jun^{2b}, WU Xia¹, YU Shuai¹

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2a. College of Resource Environment and Tourism; 2b. College of Elementary Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Using GRACE gravity satellite data combined with GLDAS data inversion can obtain the change of groundwater reserves, which can monitor the change of groundwater reserves in the study area on a large scale, but the spatial resolution of the obtained data is only 0.25°, and it is difficult to be applied in the small scale. Based on the spatial relationship between GRACE terrestrial water storage and GLDAS shallow surface water storage and precipitation, NDVI, a downscaling method of groundwater storage change based on geographically weighted regression model (GWR model) was proposed, and the spatial resolution of groundwater storage was downscaled to 1 km. The results show that the GWR model downscaling method is successfully applied to the Haihe River Basin. The correlation coefficients between the groundwater storage data after downscaling and the measured groundwater level data at 46 verification points are all greater than 0.6, and the simulation results are reasonable and reliable. Furthermore, the temporal and spatial variation characteristics of groundwater storage in Haihe River Basin and Beijing Plain were analyzed by using the downscaling results. The results are highly consistent with the existing data, indicating that the downscaling method based on GWR model can effectively improve the spatial resolution of groundwater storage change data.

Key words: GRACE; GLDAS; groundwater storage changes; GWR downscaling; water resources monitoring