doi: 10.6046/gtzyyg.2018.02.18

引用格式: 束秋妍,潘云,宫辉力,等. 基于 GRACE 的华北平原地下水储量时空变化分析[J]. 国土资源遥感,2018,30(2): 132-137. (Shu Q Y, Pan Y, Gong H L, et al. Spatiotemporal analysis of GRACE – based groundwater storage variation in North China Plain[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2018,30(2): 132-137.)

基于 GRACE 的华北平原地下水储量时空变化分析

束秋妍^{1,2},潘云^{1,2},宫辉力^{1,2},黄志勇^{1,2},郑龙群^{1,2}

(1.首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048; 2.首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048)

摘要:利用 GRACE(gravity recovery and climate experiment)重力卫星数据反演 2003—2015 年间华北平原地下水储 量变化,并在此基础上利用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析方法对结果进行了时空特征分 析。研究表明,华北平原地下水储量变化可以分解为3个主要模态,其对总体变化的解释率达到96.35%。其中, 第1模态解释率约为80%,空间变化一致,表现出多年趋势性减少与年内季节性变化相结合的特征,推测可能由研 究区内地下水开采和年内降水分布共同作用导致; 第2和第3模态分别表现出东北—西南和西北—东南2种变化 相反的空间格局,对总体变化的解释率分别约为12%和5%,在时间上没有明显的趋势性变化,推测可能主要受沿 海-内陆、山前-平原的水循环和水文地质条件控制。研究有助于进一步了解华北平原地下水储量变化的时空特 征与驱动机制。

关键词:地下水储量变化;华北平原;GRACE;EOF 中图法分类号:TV 211.1 文献标志码:A 文章编号:1001-070X(2018)02-0132-06

0 引言

华北平原为我国第二大平原,也是我国的政治 中心所在,人口稠密,是以旱作为主的农业区,拥有 全国最大的小麦、玉米种植区,是全国重要的粮食基 地。华北平原也是我国北方缺水较严重的地区,人 均水资源量仅有450 m³,低于国际公认的极度缺水 的标准(500 m³)^[1]。地下水是区内主要供水源,随 着工农业的生产发展及人口数量的不断增加,地下 水的开采强度和开采规模不断增大。据统计,目前 华北平原有地下水开采井约200万眼,从1985年到 20世纪末,多年平均开采量已超过10¹⁰m^{3[2]},且大 部分用于农业灌溉。研究华北平原地区地下水储量 变化的空间分布特征及时间变化规律,对于该区地 下水资源可持续利用具有重要意义。

传统监测地下水储量变化一般利用监测井进行 检测。这种实地测量地下水的方法仅依靠单点的地 下水位,难以充分反映地下水储量在空间上和时间 上的变化特征。GRACE(gravity recovery and climate experiment)重力卫星作为一种监测地表水储量变化的新型手段,打破了传统地面观测在时间和空间上的局限性,并已在国内外地下水水储量变化研究中得到了应用^[3-5]。

经验正交函数 (empirical orthogonal function, EOF)分析方法,通过分析矩阵数据中的结构特征, 提取数据主要特征量,在水储量研究方面应用广泛。 Awange 等^[6]利用 EOF 方法研究了埃塞俄比亚地区 的陆地水储量、土壤湿度和降水的时空变化特征,并 分析了三者的相关性及陆地水储量变化对降水的滞 后性; Kang 等^[7]利用重力卫星数据结合 EOF 分析 了中国 2003—2010 年间陆地水储量变化特征,发现 水储量季节性变化与降水关系密切,其中梅雨季节 和重大干旱时期在 EOF 分解的模态中都有体现; 阎福礼等^[8]运用 EOF 方法分解了基于 GRACE 得到 的长江流域水储量变化,较好地解释了该流域水储 量变化的空间规律。

本文基于 GRACE 重力卫星反演华北平原地下 水储量变化,并用实测数据加以验证。运用 EOF 对 华北平原 2003—2015 年间地下水储量变化进行分

收稿日期: 2016-09-20;修订日期: 2016-10-20

基金项目:北京自然科学基金项目"变化环境下北京平原区降水人渗系数取值研究"(编号:8152012)、国家自然科学基金项目"不同 植被覆盖条件下产生地下水净补给的年降水量阈值研究"(编号:41101033)和"北京地区地面沉降三维形变及演化机理研 究"(编号:41130744)共同资助。

第一**作者方数转形**(1990-),女,硕士研究生,主要从事遥感水文等方面的研究。Email: qiuyan_grad@163.com。

解,分析地下水储量变化的时间和空间特征,并探讨 控制其时空变化的主要因素。

1 研究区概况

华北平原位于我国东部,分布范围为 E113.0°~ 119.5°,N34.5°~40.5°。北靠燕山,西傍太行山,南 抵黄河下游,东临渤海,包括京津2市与河北省的全 部平原区,以及山东、河南2省黄河以北的平原区, 面积约为14万km²,总人口约1.33亿。华北平原 地势较低,最高海拔为100m左右,自北、西、南3个 方向向渤海湾倾斜,海拔高度逐渐降低^[9]。该区气 候属中纬度大陆性半干旱季风气候,具有四季分明 的特点,多年平均降水量约为550mm,年内降水多 集中在7—9月,占全年降水量的75%左右,冬季降 水较少。华北平原有黄河、海河及滦河等大河流,此 外还有徒骇河、马颊河及河北沿海诸河等直接入海 的小河流,共有大小河流近60条。研究区位置如图 1所示。



Fig. 1 Location of study region

2 数据与方法

2.1 数据源

将德国地学研究中心发布的 GRACE 重力场模型产品减去一个平均重力场(或背景重力场),便可获取重力异常或时变部分。本文减去的是 2005 年

1月至2010年12月平均重力场。所采用核函数格 网分辨率为1°,经球谐展开并截断至60阶,去条 带、高斯滤波处理(半径为200km)后得到2003年1 月—2015年8月期间152个月的陆地水储量变化 (terrestrial water storage, TWS)数据,缺省月份的数 据在实验处理的过程中一般取相邻数据的均值来 替代。

由美国航空航天局戈达德空间飞行中心和美国 海洋和大气局国家环境预报中心联合开发的全球陆 面数据同化系统 (global land data assimilation system version1,GLDAS – 1),可获取高精度、高空间分辨率 的陆表水储量和能量信息。该系统驱动4个陆面过 程模型:通用陆面模型(common land model,CLM), Noah,Mosaic 以及可变入渗能力模式(variable infiltration capacity, VIC)。本文采用 2003 年 1 月— 2015 年 8 月期间 CLM 模型的每月 1°×1°土壤水储 量(soil moisture storage,SMS)数据集。

从 GRACE 得到的 TWS,包括地表水(湖泊、水 库)、土壤水、地下水、雪水当量和植被冠层含水量 等。反演地下水储量需考虑研究区域水文地质条 件,扣除非地下水量。对于干旱半干旱区,土壤水储 量是主要的非地下水部分。本文结合 GRACE 监测 的总陆地水储量变化 Δ*TWS* 和水文模型得到的土壤 水储量变化 Δ*SMS* 分离出地下水储量(ground water storage,GWS)变化,即

$$\Delta GWS = \Delta TWS - \Delta SMS_{\circ} \tag{1}$$

本文采用的实测地下水位数据来源于中国地质 监测院编著的地下水位年鉴,共搜集了 2005 年 1月—2013 年 12月期间年鉴中连续监测地下水位 观测井数据,共64 个;采用的降水数据来自中国气 象数据网(http://data.cma.cn/),选取了 2003 年 1月—2014 年 12月期间华北平原境内 18 个连续监 测降水站点的观测数据。

2.2 EOF 分析法

EOF 分析也称经验正交函数分解,基本原理是 对包含若干个空间点的变量随时间进行分解。设样 本容量为 m 个点的资料,则空间中任意一点 i 和任 一时间点 j 的变量值 x_{ij} 可看成由 n 个空间函数 eof_{ik} 和时间函数 t_{kj} ($k = 1, 2, \dots, n$)的线性组合^[10]。 将得到的 GWS 距平场以矩阵的形式表示如下

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \cdots, m, \quad j = 1, 2, \cdots, n \quad ,$$
(2)

万方数据

式中: *m* 为空间点的个数,即空间网格点和测站等; *n* 为时间样本数; *X* 中第 *j* 列 $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$ 即为第 *j* 个空间场。

然后计算矩阵 X 的协方差阵 C,即

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{m} \times \mathrm{m}} = \frac{1}{n} \boldsymbol{X} \boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \quad (3)$$

计算 C 的特征根($\lambda_1, \dots, \lambda_m$)和特征向量 $V_{m \times m}$,二 者满足

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}\times\mathrm{m}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}\times\mathrm{m}} = \boldsymbol{V}_{\mathrm{m}\times\mathrm{m}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{m}\times\mathrm{m}}, \qquad (4)$$

式中A是m×m维对角阵,即

$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 \cdots & \lambda_m \end{bmatrix}$$
(5)

将特征值 λ 从大到小顺序排列, $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_m$,每个非 0 的特征根对应—列特征向量值,也称 eof。将特征向量投影到原始资料矩阵 $X \perp$,就得到 所有空间特征向量对应的时间系数(即主成分),表 达式为

$$PC_{\mathrm{m}\times\mathrm{n}} = V_{\mathrm{m}\times\mathrm{m}}^{\mathrm{T}} X_{\mathrm{m}\times\mathrm{n}} , \qquad (6)$$

式中 PC 中每行数据就是对应每个特征向量的时间 系数。

通常情况下,用前几个模态就可以近似地反映 变量场的主要时空变化。模态的重要性可以用特征 根的大小来判断,即特征根越大则其所对应的模态 也越重要,同样表明对总方差的贡献率越高。第 *i* 个模态对整个变量场的贡献率 *P* 为

$$P = \lambda_i / \sum_{k=1}^m \lambda_k \quad (7)$$

实际资料数据通过 EOF 分解后得到的空间模态是否是随机的,是否有物理意义,需要进行显著性检验^[11]。在 95% 置信度水平下特征根的误差可通过式(8)得到检验,即

$$\Delta \lambda = \lambda \sqrt{\frac{2}{N^*}} , \qquad (8)$$

式中: $\Delta \lambda$ 为特征根误差; λ 为各模态特征根; N^* 为 自由度。当相邻的 2 个特征值满足 $\lambda_j = \lambda_{j+1} \ge \Delta \lambda$ 时,就认为这 2 个特征根可以分离,它们之间存在显 著差别,其所对应的 EOF 才具有物理意义,否则将 被排除。

3 结果与讨论

3.1 反演结果验证

计算华北平原内各个观测井从 2005—2013 年间的实测地下水数据均值,与 GRACE 计算得到的相应时段的 GWS 进行比较,检验数据精度。对比结果如图 2 和表 1 所示。



and GWS in situ

表 1 GRACE 反演和实测 GWS 年度振幅变化

Tab. 1 Annual amplitude of GRACE GWS and GWS in situ (mm											
周年 GWS 均值	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010年	2011 年	2012 年	2013 年	均值	方差
GRACE 反演值	126.5	189.2	136.2	88.1	108.2	106.2	124.6	172.5	164.5	135.1	33.7
观测井实测值	182.1	148.6	173.8	111.1	152.4	142.0	145.7	150.7	136.7	149.2	20.5

从图 2 可以看出,2 组数据的皮尔逊系数(pearson correlation coefficient)达到了 0.754,说明实测地 下水数据和计算得到的地下水数据具有较强相关 性,表现在数据的周期和年度振幅变化一致性较好。 表 1 中,GRACE 反演得到地下水年度振幅均值为 135.1 mm,方差为 33.7,实测地下水周年振幅均值 为 149.2 mm,方差为 20.5。

3.2 GWS 变化 EOF 分解

表2<u>为华北平</u>原GWS变化进行EOF分析后得

出的前5个模态的方差贡献率。

表 2 华北平原地下水储量变化 EOF 分解后前 5 个 模态累积方差贡献率

Tab. 2 Accumulated variance contribution rate of the first

5 EOF models of GWS in North China Plain (%)

会物	EOF 模态							
29 XX	1	2	3	4	5			
方差贡献率	79.93	11.76	4.66	1.68	0.81			
累计	79.93	91.69	96.35	98.03	98.84			

可以从表2中看出,模态1的方差贡献最大达

到 79.93%, 远大于其他特征向量的方差贡献率, 第 2 模态和第3 模态方差贡献急剧收敛, 分别为 11.76% 和4.66%, 前3 个模态的累积贡献率达到 96.35%, 基本可解释大部分变化特征, 其余模态所占比重较 小。而且当相邻的2 个特征根过于接近时, EOF 采 样变异性会明显增大^[12]。

在95% 置信度水平下,按照式(5) 计算特征根 误差(图3)。从特征根误差范围看,第1—3 模态特 征根误差范围没有重叠,存在显著差别。而第4个 特征根及以后的特征根误差范围基本上重叠,没有 显著差别。综上考虑,本文仅选取前3个模态所对 应的典型场,进一步分析华北平原 GWS 变化时空变 化特征。



Fig. 3 Characteristic root of each EOF model of GWS in North China Plain

3.3 GWS 变化主要时空特征





从图4中可以看出,第1特征向量场在华北平 原内符号相同,表明华北平原地下水储量变化在空 间变化上具有很好的一致性,表现为区域内地下水 储量的增加或者减少,但南北地下水储量的变化幅 度不同,南强北弱。这种全区一致的特性占总体方 差的 79.93%, 说明影响华北平原地下水储量变化 的因素比较单一,第1模态基本上表达了华北平原 水储量变化场的主要结构。正值中心位于冀鲁豫3 省交界区域,表明该区域的地下水变化幅度最大。 从图 4(b) 可以看出, 第1 模态空间向量场对应的权 重在逐渐减少,华北平原地下水呈现减少趋势。但 这种多年的趋势性减少又表现出明显的年内季节 性,即1-6月份表现为储量减少,而6-12月份表 现为储量增加。这种趋势性减少、季节性变化与华 北平原的地下水开采利用、降水量年内分布特征密 切相关。由于长期过量超采^[5],华北平原地下水储 量在多年变化上表现为持续下降。这种下降主要是 由于冬小麦的灌溉引起的^[5]并导致了上半年地下 水储量减少。在下半年,经过6-9月份的雨季补 给,地下水储量又得到一定程度的恢复。从第1模 态的方差贡献率看,这种自然-人为叠加的变化模 式是华北平原 GWS 变化的主要特征,约占其总体变 化的80%。第2特征向量场的方差贡献率为11.76%, 表现为东北—西南格局,反映了沿海与内陆地下水 变化呈现相反的趋势。正值中心在河南北部,0值 线出现在研究区域中央,负值沿渤海湾分布。时间 序列没有明显的趋势性变化,但年内波动大。这种 时空变化可能与沿海 - 内陆的水文条件变化有关。 第3特征向量场方差贡献率为4.66%,呈现出西 北—东南相反的变化趋势。负值中心集中在太行山 脉和燕山山脉的山前平原区,正值集中在渤海湾北 部和南部地区。时间序列同样没有明显的趋势性特 征。该模态可能受山前 - 平原的用水结构、水文地 质条件影响,与 Huang 等^[13]研究结果相似,在山前 地区地下水开采强度大,但补给量也大,地下水动态 强烈。

4 结论

本文利用 GRACE 数据反演了华北平原 2003 年1月—2015年8月地下水储量变化,采用 EOF 方 法对此进行时空分解,得到反映数据特征的前3个 特征向量场,并对特征向量场和时间系数进行分析, 得到如下结论:

1)华北平原地下水储量变化可以分解为3个 主要模态万克教提体变化的解释率达到96.35%。 2)第1模态空间变化一致,表现出多年趋势性 减少与年内季节性变化相结合的特征,可能由研究 区内地下水开采、年内降水分布共同作用导致。这 也是目前华北平原地下水储量减少的主要模式,对 整体变化的解释率约为80%。

3)第2和第3模态分别表现出了东北—西南和 西北—东南2种变化相反的空间格局,对总体变化 的解释率分别约为12%和5%,在时间上没有明显 的趋势性变化,推测可能主要受沿海-内陆、山前-平原的水循环和水文地质条件控制。

参考文献(References):

- [1] 张利平,夏 军,胡志芳.中国水资源状况与水资源安全问题分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.
 Zhang L P,Xia J,Hu Z F. Situation and problem analysis of water resource security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2009,18(2):116-120.
- [2] 刘昌明. 建设节水型社会 缓解地下水危机[J]. 中国水利, 2007(15):10-13.
 Liu C M. Building water - saving society and alleviating groundwater crisis[J]. China Water Resources, 2007(15):10-13.
- [3] Yeh P J F, 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(12) W 12203:1-7. doi:10.1029/2006WR005374.
- [4] 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.
- [5] 张光辉,费宇红,刘春华,等. 华北平原灌溉用水强度与地下水 承载力适应性状况[J]. 农业工程学报,2013,29(1):1-10.
 Zhang G H, Fei Y H, Liu C H, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(1):1-10.
- [6] Awange J L, Gebremichael M, Forootan E, et al. Characterization of Ethiopian mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets[J]. Advances in Water Resources, 2014, 74:64 – 78.
- [7] Kang K X, Li H, Peng P, et al. Low frequency variability of terrestrial water budget in China using GRACE satellite measurements from 2003 to 2010 [J]. Geodesy and Geodynamics, 2015, 6(6): 444 – 452.
- [8] 阎福礼,李书明,王世新,等. 基于 EOF 方法长江流域 2002—2013 年 GRACE 水储量时空变化研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(S1):131-137.
 Yan F L, Li S M, Wang S X, et al. Temporal and spatial variations research of GRACE water storage changes over the Yangtze River Bisin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015, 24(S1):131-137.
- [9] 张兆吉,雒国中,王 昭,等.华北平原地下水资源可持续利用 研究[J].资源科学,2009,31(3):355-360.

Zhang Z J, Luo G Z, Wang Z, et al. Study on sustainable utilization of groundwater in North China Plain [J]. Resources Science, 2009, 31(3):355 – 360.

[10] 魏凤英. 全国夏季降水区域动态权重集成预报试验[J]. 应用 气象学报,1999,10(4):402-409.

Wei F Y. Regional consensus forecast method with dynamic weighting for summer precipitation over China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorlolgy, 1999, 10(4):402 – 409.

[11] 施 能,章爱国,余锦华. 气象学中使用统计检验的几个重要注 记[J]. 气象科学,2009,29(5):670-673. Shi N, Zhang A G, Yu J H, Some important problems of the statistics test in meteorology[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29 (5):670-673.

- [12] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(7):699-699.
- [13] Huang Z Y, Pan Y, Gong H L, 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.

Spatiotemporal analysis of GRACE – based groundwater storage variation in North China Plain

SHU Qiuyan^{1,2}, PAN Yun^{1,2}, GONG Huili^{1,2}, HUANG Zhiyong^{1,2}, ZHENG Longqun^{1,2}

 College of Resource and Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
 Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: GWSA (groundwater storage anomaly) data of North China Plain from 2003 to 2015 were estimated from terrestrial water storage change (TWSC) data retrieved by monthly GRACE (gravity recovery and climate experiment). The EOF (empirical orthogonal function) method was applied to analyzing the GWSA, and it is shown that cumulative contribution rate of the first three EOF modes reached up to 96.35%. The explanation rate of the total variance of first mode reached about 80%. It is shown that GWSA in the North China Plain behaved consistently descending in the whole region with obvious seasonal fluctuations, caused by groundwater exploitation and precipitation. The second and third mode, with an explanation rate of about 12% and 5%, showed that spatial pattern in northeast – southwest direction and that in northwest – southeast direction were obviously opposite. However, no significant temporal diversification was found, presumably mainly controlled by water cycle under the coastal – inland, piedmont – plain and hydrogeological conditions. This study helps to further understand the spatiotemporal characteristics and drive mechanism of groundwater change in North China Plain.

Keywords: ground water storage variations; North China Plain; GRACE; EOF

(责任编辑:陈理)