

利用 GRACE 卫星研究河南省水储量时空变化特征

曹艳萍, 赵 芳

(河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004)

摘 要: [目的] 分析河南省 2002—2014 年的水储量时空动态变化, 为该省水资源管理、评价及可持续发展提供依据。[方法] 借助 GRACE 重力卫星反演河南省水储量变化, 分析 2002—2014 年水储量时空动态变化过程及其影响因素。[结果] (1) 河南省的水储量年内分布呈典型的“余弦函数曲线”特征, 1—7 月处于亏损状态, 8—12 月处于盈余状态; 水储量变化峰值出现时间滞后降水峰值 2 个月。(2) 河南省水储量观测期内呈递减趋势, 递减速率为 -6.34 mm/a ; 空间上, 水储量减少速率自南向北递增。[结论] 通过定量计算人类活动总耗水量及水储量年变化率可初步推断, 河南省水储量变化 1/3 受人类活动影响, 2/3 受自然因素影响。

关键词: GRACE 重力卫星; 水储量; 河南省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0295-07

中图分类号: P332, TP79

文献参数: 曹艳萍, 赵芳. 利用 GRACE 卫星研究河南省水储量时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 295-310. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.045; Cao Yanping, Zhao Fang. Terrestrial Water Storage Changes of He'nan Province from GRACE Satellite[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 295-310. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.045

Terrestrial Water Storage Changes of He'nan Province from GRACE Satellite

CAO Yanping, ZHAO Fang

(School of Environment and Planning, He'nan University, Kaifeng, He'nan 475004, China)

Abstract: [Objective] Studying the spatio-temporal variations of water storage in He'nan Province to provide a theoretical basis for the rational planning of agricultural development. [Methods] The spatio-temporal variations of terrestrial water storage changes (TWSC) of He'nan Province were derived from GRACE during 2002—2014, and the influence factors were analyzed. [Results] (1) The annual variation of TWSC in He'nan Province presented a cosine-shaped curve, in a loss state between January and July, and getting surplus between August and December. The lag time between the peaks of TWSC and precipitation was two months. (2) He'nan TWSC presented a decreasing trend during the observation period at a rate of -6.34 mm/a . Geographically, the reduction rate of water reserves was higher at the south part than that at the north part. [Conclusion] Through quantitatively calculation of the annual variation ratio of total water consumption of human activities and TWSC, it can be concluded that about 1/3 variation of water storage in He'nan Province is contributed by human activities, and the other part, about 2/3 of the variation came from natural factors.

Keywords: GRACE gravity satellite; water storage; He'nan Province

河南省是全国重要的农业大省和人口大省, 水资源总量有 $4.13 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 居全国第 19 位^[1]; 为满足巨大水资源需求量, 正常年份全省约缺水 $5.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[2], 因此, 河南省是水资源严重贫乏的省份。近些年, 随着气候趋于干暖、人口增长、城市化和社会经济发展等, 水资源匮乏问题越发严重。在这种大的社会背景及气候条件下, 区域水储量总量在时空上的动态变化

直接关系到其工农业发展及人类日常生活。此外, 该省处于暖温带和亚热带气候交界处, 其气候具有显著过渡性。因此, 研究河南省水文水资源的时空动态变化, 对于保护和合理开发利用水资源, 制定合理管理措施等具有非常重要的意义^[2]; 也为了解暖温带—亚热带过渡区的水文水资源对气候变化的响应特征提供科学依据。

收稿日期: 2016-09-01

修回日期: 2016-09-21

资助项目: 高等学校重点科研项目“中原农区冰雹天气中降落落区的精细化计算方法研究”(17A170005); 河南大学科研启动经费项目

第一作者: 曹艳萍(1986—), 女(汉族), 河南省封丘县人, 博士研究生, 讲师, 主要从事水文遥感等方面的研究。E-mail: 0310cyp@163.com。

通常利用气象、水文站点数据资料分析区域水文水资源动态变化特征,如利用逐日降水、气温资料等发现 1957—2005 年河南省极端降水事件和严重干燥事件发生频率呈增加趋势^[3];基于《河南省水资源公报》中记录的数据资料发现 1956—2010 年河南省水资源总量呈减少趋势,速率为 $1.085 \times 10^9 \text{ m}^3/10 \text{ a}$,大于降水资源量的减少速率^[4]。除气象水文资料外,近些年水文模型被广泛应用于水文水资源评估中。例如,应用 SWAT 模型分析河南省中部农业区的径流对气候变化的响应,发现该地区的地表径流、基流的年内变化趋势与降水相一致,且地表径流滞后降水^[5]。实测的气象、水文资料多是单点数据,从点到面的尺度转换过程中误差难以避免,且不确定性很难估算;而水文模型较适合应用于流域范围内,对于行政区域要求考虑的要素更加复杂。随着遥感技术的发展,借助重力卫星监测区域或流域尺度水储量时空动态变化逐渐成为一种新型定量遥感方法。地球重力场是地球内部和表面质量分布的产物,这些物质质量的变化或迁移会引起相应地球重力场发生变化。地球重力场包括静态重力场和时变重力场两部分,其中静态部分占了一大部分,但是该部分的变化在人类时间尺度上是微小的,通常忽略不计;时变重力场部分包括:大气、海洋、陆地水等的质量变化或重新分布。所以,可以认为重力卫星观测到的时变重力场是由地球表面约 $10 \sim 15 \text{ km}$ 以内的质量变化引起的^[6]。而对于 GRACE 的时变重力场模型,包括海潮、固体潮、地球自转产生的极潮等潮汐影响,及大气和海洋等产生的非潮汐影响,已经在 GRACE 数据预处理过程中被扣除,因此,对于陆地部分,水质量的变化是引起地球重力场时变的主要原因^[7]。通过观测时变重力场的变化可以反演区域陆地水储量变化,在垂直方向上,该水储量代表的是区域地下水、土壤水、地表水、冰/雪水及生物含水量等 5 部分的集成。

许多国内外学者利用 GRACE 卫星时变重力场模型观测区域或流域水储量年内季节变化特征和长时间序列的趋势变化特征,如:中国及周边地区^[8]、中国西南地区^[9]、中国华北地区^[10]、云南省^[11]、长江^[12]、黑河流域^[13]等,以及国外的亚马逊流域^[14]、伊利诺伊州^[15]等。利用 GRACE 卫星时变重力场模型研究水储量变化特征,不同地区陆地水储量在时间尺度上存在明显的差异。曹艳萍等^[13]借助 GRACE 数据分析黑河流域水储量在 2002—2008 年的时空动态变化,发现黑河流域水储量呈增加趋势;但是苏晓莉等^[10]基于 2002—2010 年的 GRACE 数据,探测到华北地区的陆地水储量以 11 mm/a 的速率在减少。除

了时间变化,同一地区水储量变化存在空间差异,比如利用 GRACE 卫星发现北美洲中部的的水储量在过去 10 a 以 $43.0 \pm 5.0 \text{ Gt/a}$ 的速率增加;而斯堪的纳维亚的南部地区呈微弱增加,速率是 $2.3 \pm 0.8 \text{ Gt/a}$ ^[16]。Amazon 流域的西部和中部地区在 2005 年下半年发生干旱事件,水储量严重亏损;而东部、北部及南部地区于 2006 年的 6—7 月的处于非常湿润状态,水储量严重饱和^[17]。早在 GRACE 卫星发射前,Wahr 等^[6]通过模拟研究表明了 GRACE 在探测陆地水储量变化方面的潜在价值,并详细分析讲解了 GRACE 数据反演陆地水储量变化的基本原理和方法。基于这些原理和方法,展开了一系列应用研究及验证工作^[12-13],Wahr 等^[18]利用 GRACE 卫星数据反演全球陆地区域水储量变化,研究表明 GRACE 反演水储量变化结果与水文模型模拟结果相一致。胡小工等^[19]利用 GRACE 时变重力场模型监测长江流域水储量季节性变化,且发现 GRACE 结果与 CPC, GLDAS 两个水文模型的输出水储量变化结果符合相当好。

大量研究表明,GRACE 卫星能够敏感地反映出区域水储量总量的时空动态变化。本研究基于 GRACE 卫星数据,在分析河南省 2002—2014 年的水储量时空动态变化的基础上,获知河南省水资源总量现状,探讨水储量与气候因子、人类活动的相互作用和影响,在一定程度上丰富和补充了河南省水资源时空变化特征,及其与气候因子、人类活动关系方面的研究工作,为河南省水资源管理、评价及可持续发展提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

河南省位于我国中东部,经纬度范围为北纬 $31^{\circ}23'$ — $36^{\circ}22'$,东经 $110^{\circ}21'$ — $116^{\circ}39'$,包含 17 个地级市、1 个省直辖县级市,该省土地面积为 $1.67 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。地处中国第 2 阶梯和第 3 阶梯的过渡带,其地形地貌、气候条件、土壤植被具有明显的过渡性特征。地势整体西高东低,南、西、北三面环山,中、东部属于华北平原区域,西南部为南阳盆地;气候以暖温带为主,南部区域跨亚热带,属于北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候,同时还具有自东向西由平原向丘陵山地气候过渡的特征;复杂多样的地貌类型为农林发展提供有利的条件,东部黄淮平原以农田植被为主;西部山地丘陵地区分布地带性植物,主要为暖温带落叶阔叶林地带,及北亚热带落叶阔叶林与常绿阔叶混交林地带。河南省年均气温为 $12.2 \sim 16.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量为 $478.6 \sim 1116.9 \text{ mm}$ ^[20],时空分布不均匀,夏季

降水量占全年降水量的 50%~60%, 冬季最少, 仅占全年降水量的 3%~10%^[21]; 空间上呈自东南向西北递减规律^[22]。该省水资源总量多年平均值为 $4.25 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 其中地表水资源量为 $3.13 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 地下水资源量为 $2.16 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 二者重复 $1.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[4]。自南向北跨越长江、淮河、黄河、海河 4 大流域, 不同地域水资源量差异显著, 2001—2011 年上述 4 大流域在河南省境内的平均水资源总量分别为 $7.903 \times 10^9 \text{ m}^3$, $2.50 \times 10^{10} \text{ m}^3$, $5.903 \times 10^9 \text{ m}^3$, $2.53 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[23]。

1.2 数据与处理

基于 GRACE 卫星数据和气象、水文数据反演得到河南省水储量总量变化, 并结合降水、气温及区域耗水量等资料探讨其变化缘由。

1.2.1 GRACE 卫星数据 本研究 GRACE 数据为 GRACE CSR 中心公布的 Level-2RL05 数据产品, 该套数据以球谐系数的形式给出, 最高阶次是 96, 时间分辨率是 1 个月。数据获取后需要对数据进行一系列的处理, 包括: 填补或替换 GRACE 数据低阶项系数^[24-25], 计算时变重力场模型球谐系数, 去相关滤波处理^[26], 扇形滤波处理^[27]等。预处理后基于水储量变化反演原理^[6] 计算得到河南省水储量变化量 (TWSC), 时间分辨率是 1 个月, 空间分辨率是 0.1° 。

1.2.2 气象、水文数据资料 气象资料来自中国区域高时空地面气象要素驱动数据集 (China meteorological forcing dataset), 简称为 ITP 数据^[28-29]。该数据集是以国际上现有的 Princeton 再分析资料, GEWEX-SRB 辐射资料, global land data assimilation system (GLDAS) 陆面过程模式数据资料, 以及 tropical rainfall measuring mission (TRMM) 卫星降水资料为背景场, 同时融合了中国气象科学数据共享服务网提供的全国气象站点的常规观测数据, 具有高时空分辨率、高精度的优势。ITP 数据空间上覆盖整个中国, 时间跨度为 1979—2012 年, 其时间分辨率为 3 h, 空间分辨率为 0.1° 。本研究主要采用该数据集的降水和气温资料, 从基金委国家地球系统科学数据平台—寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>) 获取。本研究依据河南省的矢量边界, 基于 ArcGIS 软件平台, 首先将研究区域内的格网降水和气温从中国区域格网数据集中裁剪出来, 然后对研究区域内的格网降水、气温数据进行加权求平均, 得到研究区域的区域平均降水、气温数据, 最后结合 GRACE 数据, 讨论降水和气温对区域水储量变化的影响。除上述 ITP 的降水、气温资料, 本研究还依据《河南省水资源公报》整理出了 2003—2014 年河南省总耗水量及不同结构耗水量等水文资料。

1.3 分析方法

1.3.1 一元线性趋势回归分析 趋势线是对时间序列数据进行回归分析, 得到其变化趋势。采用线性趋势线来模拟河南省每个格网的水储量、降水、气温的年际变化。斜率计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: n ——分析变量的年数; Y ——水储量或降水量 (mm), 或气温 ($^\circ\text{C}$); i —— $1, 2, \dots, n$ 。slope——正值表示分析变量在年际上呈增加趋势, 负值表示其呈减少趋势。

1.3.2 Mann-Kendall 趋势检验方法 趋势分析是研究气候变化和水文时间序列变化规律的重要途径。关于时间序列趋势显著性检验的统计方法很多, 应用较为广泛的是非参数 Mann-Kendall 趋势检验方法 (简称 M-K 趋势检验法)。该方法基于秩的非参数方法, 由于其不要求所分析数据遵循某一概论分布, 且其趋势检测能力与参数趋势检验方法相同, 因此被广泛应用于全球不同区域水文时间序列的趋势特征分析过程中^[30]。

2 结果与分析

利用 GRACE 数据监测河南省水储量在时间和空间 2 个尺度上的动态变化, 分别进行变化特征分析。

2.1 年际变化

图 1 为河南省水储量、降水量月动态变化图, 其中水储量正值表示其处于补给状态, 负值表示其处于亏损状态。由图 1 可以看出, 2002 年 8 月至 2014 年 10 月期间河南省水储量在 $-133 \sim 210 \text{ mm}$ 波动变化; 其中 2004 年 9 月水储量盈余最大, 2014 年 6 月水储量亏损最大。观测期内, 水储量明显分为 3 个阶段: 2002 年 8 月至 2005 年 12 月水储量明显处于补给状态, 各月水储量变化量平均值为 20 mm ; 2006 年 1 月至 2009 年 12 月水储量在平衡状态附近轻微波动, 各月水储量变化量平均值为 4 mm ; 2010 年 1 月至 2014 年 10 月水储量呈显著亏损状态, 各月水储量变化量平均值为 -26 mm 。整体来看, 河南省水储量变化波动规律与降水基本一致, 但水储量波峰波谷出现时间较降水略微滞后。观测期内河南省水储量呈递减趋势。

2.2 年内变化

图 2 为河南省 1—12 月的多年平均水储量变化值和多年平均降水量分布图。由图 2 可知, 河南省降水年内变化趋势呈单峰曲线; 降水集中分布在 5—9 月, 累计降雨量为 579.0 mm , 占全年降水量的 73.0%; 7

月降水量达到峰值,为 182.4 mm,占全年降水量的 23.0%。河南省的水储量总量年内分布呈典型的“余弦曲线”特征,1—7 月处于亏损状态,其中 6 月水储量亏损最严重,亏损值为 59.3 mm。8—12 月处于盈余状态,其中 9 月盈余量最大,为 56.0 mm。从河南省降水和水储量变化特征来看,水储量的盈余和亏损明显受降雨影响,降水多的月份,水储量多为盈余状态;降水少的月份,水储量多处于亏损状态;水储量峰值的出现时间比降水滞后 2 个月。月份间水储量变化的斜率,反映出区域水储量消耗与补给的变化情况。河南省 6—9 月水储量变化的斜率为正,表明 7—9 月水储量的补给(降水等)大于消耗,水储量一直增加,9 月达到峰值。2—6 月和 9—12 月水储量变化的斜率都为负,表明 3—6 月和 10—12 月水储量补给小于消耗,水储量一致减少。1—2 月水储量变化的斜率接近 0,表明 2 月水储量的补给和消耗基本持平。水储量补给与消耗平衡状态的变化是导致区域水储量变化的根本原因,降水只是补给方式的一种,因此水储量的峰值、谷值出现的月份与降水并不完全一致。

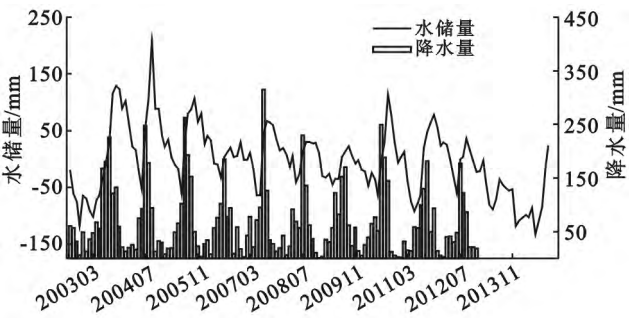


图 1 河南省水储量、降水量动态变化

2.3 年水储量变化趋势空间分布

根据一元线性趋势回归方法得到河南省水储量年变化率空间分布(图 3),并对该变化趋势进行 M-K ($\alpha=0.05$)检验(图 3)。由图 3 可知,整个河南省所有地区的水储量总量在 2003—2013 年的变化率均为负值,平均为 -6.34 mm/a ,说明 2003—2013 年河南省的年水储量呈下降趋势。河南省年水储量变化率空间分布差异明显,水储量减少速率自南向北递增。豫北地区的安阳、鹤壁、济源、焦作、新乡、濮阳,及郑州和开封的北部地区减少速率最快,减少率介于 $-8 \sim -10 \text{ mm/a}$,其显著性检验的 p 值小于 0.01(图 3)。豫东商丘、周口和豫西三门峡,洛阳及豫中的许昌、平顶山、漯河等地区水储量年变化率介于 $-6 \sim -8 \text{ mm/a}$,其中豫东商丘、周口地区显著性检验的 p 值亦小于 0.01,而豫西三门峡,洛阳及豫中的许昌、平顶山、漯河等地区显著性检验的 p 值分布在 0.01~0.05。豫南的南阳、驻马店及信阳地区水储量年变化率最小,介于 $-0.6 \sim -6 \text{ mm/a}$, p 值大于 0.05,未通过显著性检验。

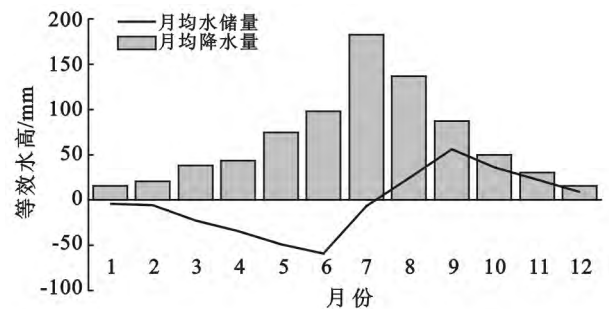


图 2 河南省 2002—2014 年平均水储量、降水年内变化

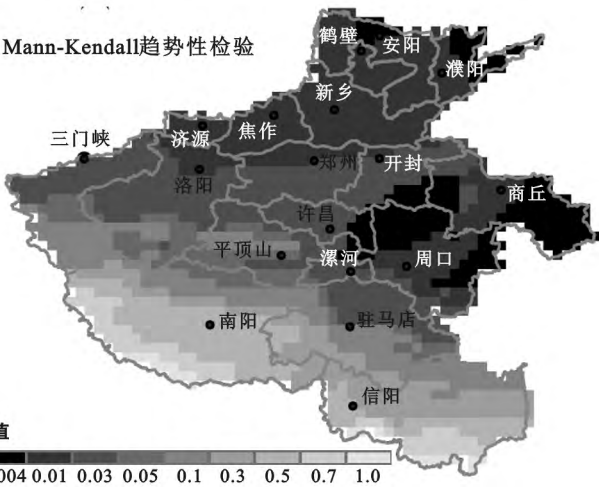
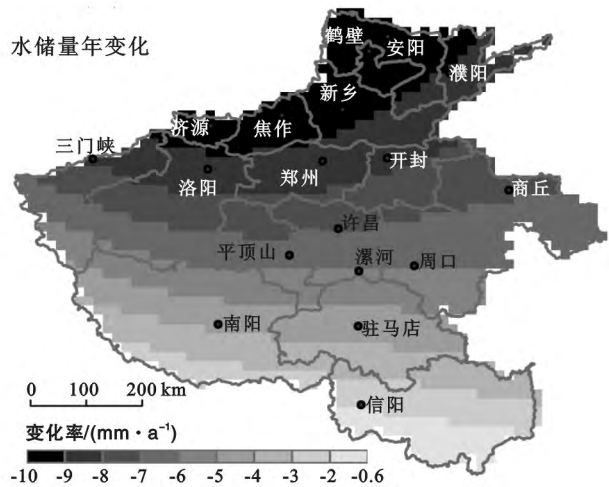


图 3 河南省水储量年变化趋势和 Mann-Kendall 趋势性检验结果

河南省大部分地区的年降水量在 2002—2012 年也呈现出明显的减少趋势(图 4),降水年际变化率的

空间分布和水储量年变化率并不一致。豫北地区水储量亏损率最大,而降水减少速率最大的是豫南的驻

马店地区。以驻马店为中心向周边扩展,减少速率递减;南阳西部山区降水略微增加。整个区域降水变化速率的递减率为 -24.2 mm/a 。

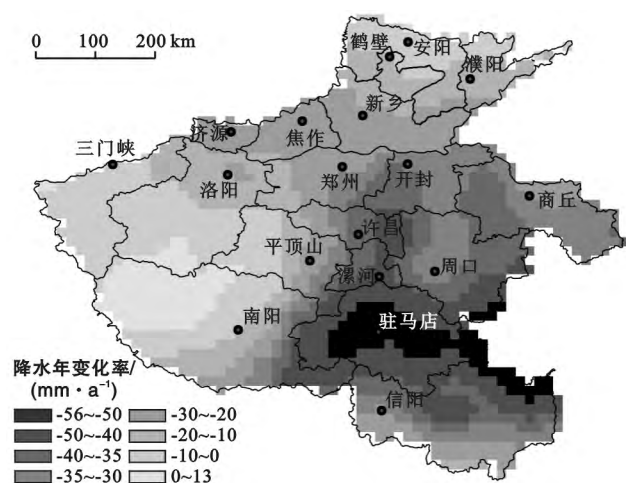


图4 河南省降水年变化趋势空间分布

气温变化通过影响蒸散发量间接影响区域水储量的变化。河南省2003—2012年气温年际变化呈增加趋势(图5),平均递增率为 $0.053 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。郑州地区东部和开封地区西南部气温增加速率最大,递增率介于 $0.08\sim 0.10 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。

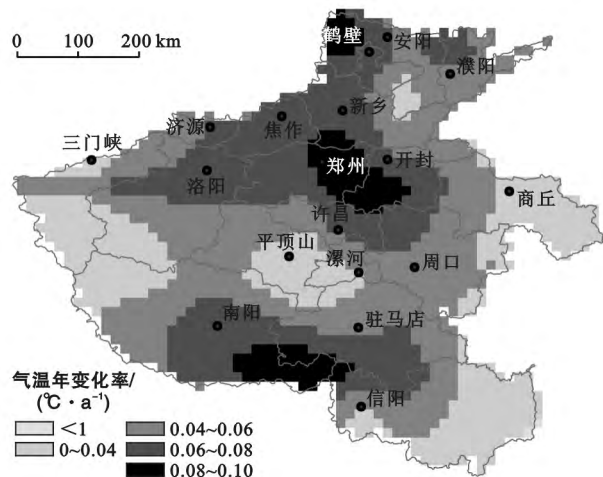


图5 河南省气温年变化趋势空间分布

3 讨论

区域水储量变化与降水变化密切相关,降水丰沛的月份,水储量多处于补给状态;降水少的月份,水储量多处于亏损状态,这在中国的西南地区^[9]、云南省^[11]、长江流域^[12]等得到了验证。河南省的水储量年际变化率为 -6.34 mm/a ,而降水也呈递减趋势,递减率为 -24.2 mm/a 。河南省水储量和降水年内分布曲线,也显示出水储量的盈余和亏损明显受降雨

影响。因此,河南省的降水对其水储量变化起重要作用。此外,由于河南省在观测期内的气温也呈现出了上升趋势,上升速率 $0.053 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。气温的上升必然导致蒸发和蒸腾作用的增强,会导致水储量减少。除了降水和气温,河南省的人类活动对水储量变化的影响也是十分巨大的。依据《河南省水资源公报》,得到2003—2014年河南省总耗水量和耗水结构(图6)。由图6可知,2003—2014年,河南省总耗水量呈快速增加趋势,以 $3.305 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速率增长,转换为等效水高为 2.0 mm/a ;其中农林渔耗水量、工业耗水量、城乡生活/环境耗水量等均呈增加趋势。河南省总耗水量增加速率占区域水储量总量减少速率约1/3,初步推断人类活动对区域水储量的影响比重为1/3,其他2/3部分由区域气象因素造成。

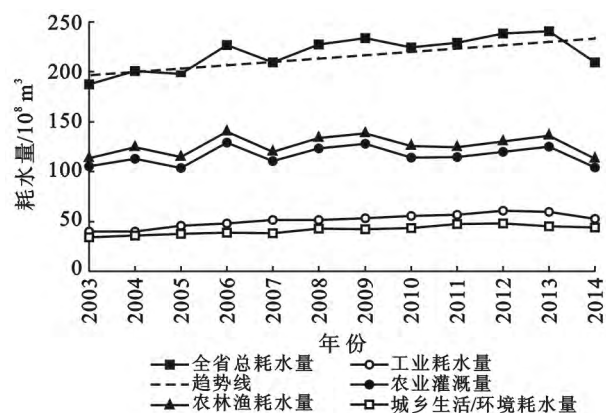


图6 河南省耗水量时序分布

河南省3—6月降水逐月增多,但区域水储量总量却逐渐减少(图2)。这可能主要是因为河南省是冬小麦的主要产区,该时期冬小麦从复苏到收割,需要大量灌溉;6月的玉米、大豆等农作物播种后的集中灌溉可能是该月区域水储量严重亏损的重要原因之一。由图3可知,河南省豫北地区的水储量亏损速率大于豫南地区,而豫北地区的降水量减少速率小于豫南地区(图4),分析除降水影响外,造成豫北地区水储量亏损严重的主要原因是地下水开采的不均衡。河南全省地下水利用率达到70%以上,其中豫北、豫东平原地区地下水利用率高达80%以上,连年超采造成地下水位连续下降,安阳—濮阳—鹤壁—新乡已形成大面积的地下水漏斗区^[23],部分城市开始采用中深层地下水来补给供水^[4]。即地下水的严重超采是豫北豫东区域水储量严重亏损的主要原因,而豫南驻马店等区域的降水量快速减少是其区域水储量减少的主要原因之一。地形和水文地质条件对区域水储量变化也有重要影响。例如,山区降水量一般较平

原区多;山区和平原区的水文地质条件的差异,导致区域水资源的存在形式及循环过程差别较大;此外,山区和平原区,人类的生产生活方式差距较大,水资源利用方式及程度迥异。河南省的山区主要分布在豫西三门峡、南阳等地区。从降水变化率的空间分布图(图 4)可知南阳西北部山区的降水增加,而河南省其他平原区、山地丘陵区降水以减少为主。从水储量变化率空间分布图(图 3)可知,河南省水储量变化纬向变化规律明显,其南部山区水储量减少速率最低,北部平原区水储量减少速率最大;降水增加明显的豫西山地地区,并未改变这种水储量的纬向分布规律,其与同纬度的平原区水储量减少速率基本一致。因此,地形和水文地质条件作为影响水储量变化的间接因素,其作用过程和影响程度有待进一步研究。

4 结 论

(1) 河南省水储量观测期内呈递减趋势,明显分为 3 个阶段:2002 年 8 月至 2005 年 12 月处于补给状态;2006 年 1 月至 2009 年 12 月在平衡状态附近轻微波动;2010 年 1 月至 2014 年 10 月呈显著亏损状态。

(2) 河南省的水储量总量年内分布呈典型的“余弦曲线”特征,1—7 月处于亏损状态,其中 6 月水储量亏损最严重,亏损值为 59.3 mm;8—12 月处于盈余状态,其中 9 月盈余量最大,为 56.0 mm。由于补给量与消耗量的阈值差异导致河南省水储量变化峰值出现时间滞后降水峰值 2 个月。

(3) 河南省所有地区的水储量总量在 2003—2013 年的变化率均为负值,平均为 -6.34 mm/a ;空间上,水储量减少速率自南向北递增。

(4) 河南省水储量变化是降水、蒸发等自然要素和人类活动共同作用的结果。通过定量计算人类活动总耗水量及水储量总量年变化率可初步推断:河南省水储量变化 1/3 受人类活动影响,2/3 受自然因素影响。

(5) 河南省水资源总量匮乏情况越发严重,需要引发政府及广大群众的注意。针对水储量总量严重亏损状态,政府需要采取合理的措施,控制农林渔耗水量、工业耗水量、城乡生活/环境耗水量等,遵循因地制宜、适地适水的原则,制定不同气候条件下的节水用水政策,提高用水效率。本研究借助定量遥感方法首次反演河南省区域尺度的水储量总量,能够精确把握其时空动态变化特征,与实测水文资料一致。该方法较常规方法省时省力,且精度高,但是该研究仍存在一些不足,研究有待进一步深化。

[参 考 文 献]

- [1] 杜华民. 河南省水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 58-62.
- [2] 顾万龙, 王记芳, 竹磊磊. 1956—2007 年河南省降水和水资源变化及评估[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(4): 277-283.
- [3] 余卫东, 柳俊高, 常军, 等. 1957—2005 年河南省降水和温度极端事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 78-83.
- [4] 张笑培, 王和洲, 杨慎骄, 等. 气候变化与河南省粮食核心区农业水资源利用浅析[J]. 河南水利与南水北调, 2012(2): 14-17.
- [5] 顾万龙, 竹磊磊, 许红梅, 等. SWAT 模型在气候变化对水资源影响研究中的应用: 以河南省中部农业区为例[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 395-400.
- [6] Wahr J, Molenarr 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 Atmospheres, 1998, 103(103): 30205-30230.
- [7] 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.
- [8] 叶叔华, 苏晓莉, 平劲松, 等. 基于 GRACE 卫星测量得到的中国及其周边地区陆地水量变化[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(5): 1580-1586.
- [9] 刘任莉, 李建成, 褚永海. 利用 GRACE 地球重力场模型研究中国西南区域水储量变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2): 39-43.
- [10] 苏晓莉, 平劲松, 叶其欣. GRACE 卫星重力观测揭示华北地区陆地水量变化[J]. 中国科学(D): 地球科学, 2012, 42(6): 917-922.
- [11] 王杰, 黄英, 曹艳萍, 等. 利用 GRACE 重力卫星观测研究近 7 年云南省水储量变化[J]. 节水灌溉, 2012(5): 1-5.
- [12] 许民, 叶柏生, 赵求东. 2002—2010 年长江流域 GRACE 水储量时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 68-77.
- [13] 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.
- [14] Chen Jianli, 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.
- [15] Rodell M, Famiglietti J S. An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [J]. Water Resources Research, 2001, 37

- (37):1327-1340.
- [16] Wang Hansheng, Jia Lulu, Steffen H, et al. Increased water storage in North America and Scandinavia from GRACE gravity data [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(1):38-42.
- [17] Xavier L, Becker M, Cazenave A, et al. 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.
- [18] Wahr J, Swenson S, Zlotnicki V, et al. Time-variable gravity from GRACE: First results [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(11):293-317.
- [19] 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):地球科学*, 2006, 36(3):225-232.
- [20] 赵国永,韩艳,郭雪莲,等. 1961—2013 年河南省气温要素时空变化特征[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(13):249-257.
- [21] 杨艺,周继良,吴明作. 河南省各地区主要作物生态需水研究[J]. *河南科学*, 2008, 26(6):676-680.
- [22] 张愿章,段永康,郭春梅,等. 河南省 1951—2012 年降水量的 Morlet 小波分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(10):25-28.
- [23] 张红卫,吴湘婷. 河南省近 11 年水资源情势变化及可
持续利用[J]. *人民黄河*, 2013, 35(9):55-56.
- [24] Swenson S, Chambers D, Wahr J. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(B8):194-205.
- [25] Chen Jianli, Wilson C R. Low degree gravity changes from GRACE, Earth rotation, geophysical models, and satellite laser ranging [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(6):3043-3061.
- [26] Swenson S, Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8):1-4.
- [27] Zhang Zizhan, Chao Benfong, Lu Yang, et al. An effective filtering for GRACE time-variable gravity: Fan filter [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17):1397-1413.
- [28] 何杰. 中国区域高时空分辨率地面气象要素数据集的建立[D]. 北京:中国科学院青藏高原研究所, 2013.
- [29] Chen Yingying, Yang Kun, He Jie, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(116):999-1010.
- [30] 于延胜,陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9):1585-1591.

(上接第 294)

- [7] 朱长明,李均力,常存,等. 新疆干旱区湿地景观格局遥感动态监测与时空变异[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15):229-238.
- [8] 李均力,姜亮亮,包安明,等. 1962—2010 年玛纳斯流域耕地景观的时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4):277-285.
- [9] 牛明香. 湿地资源遥感动态监测及其对生态环境的影响研究[D]. 山东 泰安:山东农业大学, 2004.
- [10] 刘洁. 基于 TM, ETM⁺ 影像的东平湖湿地信息提取及时空演变研究[D]. 山东 泰安:山东农业大学, 2013.
- [11] 颜凤芹,于灵雪,杨朝斌,等. 基于 Landsat8 影像的湿地信息提取最佳波段组合[J]. *地球环境学报*, 2014, 5(5):339-343.
- [12] 孙晓宇,苏奋振,吕婷婷,等. 黄河三角洲湿地资源时空变化分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(12):2277-2284.
- [13] 牛振国,宫鹏,程晓,等. 中国湿地初步遥感制图及相关地理特征分析[J]. *中国科学*, 2009, 39(2):188-203.
- [14] 周昕薇,宫辉力,赵文吉,等. 北京地区湿地资源动态监测与分析[J]. *地理学报*, 2006, 61(6):654-662.
- [15] 曾业隆,李国庆,陈奇,等. 山东半岛东部湿地景观格局变化及驱动力分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(8):78-82.
- [16] 王方雄,孙佳音,侯英姿,等. 辽河三角洲滨海湿地资源时空动态变化研究[J]. *地理空间信息*, 2014, 12(2):49-52.
- [17] 高文杰,潘继亚. 大庆湿地时空变化分析[J]. *吉林水利*, 2015(2):12-17.
- [18] 恭映璧,李春华,胡曰利. 50 年来长沙市湿地时空变化及空间自相关分析[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(14):269-274.
- [19] Zhang Lei, Wu Bingfang, Yin Kai, et al. Impacts of human activities on the evolution of estuarine wetland in the Yangtze Delta from 2000 to 2010[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(1):435-447.
- [20] 潘仕梅,史淑一,李琳,等. 山东省烟台市近年降水资源变化对农业的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(26):267-271.
- [21] 李希国,谭鼎山,王洪波,等. 近 40 年烟台地区气温与降水量变化的关系研究[J]. *山东水利*, 2006, 20(8):91-93.
- [22] 温庆可,张增祥,徐进勇,等. 环渤海滨海湿地时空格局变化遥感监测与分析[J]. *遥感学报*, 2011, 15(1):183-200.