

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2022007

引用格式: 林雪敏,李伟峰,王红,等. 我国东部沿海三大城市群地下水储量变化与驱动因素分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):262–271. (Lin X M, Li W F, Wang H, et al. Analysis of the groundwater storage variations and their driving factors in the three eastern coastal urban agglomerations of China[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 262–271.)

我国东部沿海三大城市群地下水 储量变化与驱动因素分析

林雪敏^{1,2}, 李伟峰², 王 红³, 明冬萍¹, 韩立建²

(1. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研
究中心, 北京 100085; 3. 自然资源部信息中心, 北京 100036)

摘要: 地下水超采引发的一系列地质灾害问题,严重制约了我国东部沿海三大城市群——京津冀、长三角和珠三角的可持续发展。为揭示三大城市群地下水储量时空动态变化规律及其驱动因素,本研究基于 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星数据定量反演了 2002—2016 年间 3 个城市群的地下水储量变化,并利用灰色关联分析方法进行归因分析。结果表明:①京津冀城市群地下水储量持续下降,线性下降速率为 1.17 cm/a;长三角城市群小幅波动变化,较为稳定;珠三角城市群持续上升,线性上升速率为 0.43 cm/a。②3 个城市群地下水储量变化均受人为用水因素主导,京津冀受农业用水量影响突出;长三角受农业用水量、降水量、地表水资源量和人口数量等综合影响;珠三角受农业和生活用水量双重影响。③3 个城市群地下水储量变化与驱动力的比较分析表明,城市群发展推动区域产业结构调整,促进第二、三产业升级,提升用水效率并优化用水结构,对地下水保护有积极影响。针对东部沿海城市群资源环境禀赋与战略发展布局,科学谋划农业发展布局,进一步优化升级产业结构,提升用水效率,以及防治地表水污染,是进一步保护与恢复地下水的^{关键}。

关键词: 地下水储量; 地下水利用; 城市群; GRACE; 驱动因素
中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097–034X(2022)04–0262–10

0 引言

作为重要的淡水资源,地下水提供了全球约 40% 的灌溉用水和 50% 的城市市政用水^[1],其高强度开采引发了一系列环境问题^[2–3]。在人类活动集中的城市地区,地下水超采导致的地面沉降破坏了公路、建筑物、管道和地铁等基础设施^[4],如墨西哥古兹曼市,其西北部地面沉降速度达 0.25 m/a,道路变形和建筑物损毁严重^[5]。在中国,京津冀地区地面沉降面积超过 7 万 km²;长三角地区有近 1 万 km²的地面沉降超过 0.2 m^[6];珠三角部分地区地面塌陷造成的直接经济损失超过 1.2 亿元^[7]。此外,地下水超采还会增加沿海城市海水入侵的风险^[8],如印度尼西亚首都雅加达海岸带年沉降量达 2.8 m,大量沿海建筑物被淹没。作为沿海城市群,地下水超采造成了京津冀、长三角和珠三角部分海

岸带海水入侵范围不断扩大,生态环境持续退化^[9]。地下水超采严重威胁城市群的生态安全和可持续发展。因此,探究地下水储量变化及其驱动因素,揭示不同城市群发展模式对地下水的影响,对于指导未来城市群发展与地下水资源的合理利用具有重要的科学意义。

目前,地下水储量变化监测的方法主要有传统的站点监测和 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星监测。其中,站点监测受观测井数量和分布限制,难以及时高效地评估大范围地下水储量的时空变化^[10–11]。GRACE 任务通过 2 颗共轨卫星监测地球的时变重力场(主要由陆地水量变化控制)^[12],并依据陆地水量平衡原理推算地下水储量的变化,该方法不受空间限制,时效性高,应用广泛^[13–14]。Kalhor 等^[15]和 Gao 等^[16]利用 GRACE 数据分别反演了美国亚特兰大市和中国张家口市的地下水储量变化,并与实测数据对比证明了 GRACE

收稿日期: 2022–01–12; 修订日期: 2022–05–11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“基于协同机制的城市群地区水资源供求关系调控路径研究”(编号: 31971482)资助。

第一作者: 林雪敏(1998–),女,硕士研究生,主要从事地下水资源遥感相关方面的研究。Email: 2004190027@cugb.edu.cn。

通信作者: 李伟峰(1977–),女,副研究员,主要从事城镇化模式与生态环境效应相关方面的研究。Email: Li_wf@rcees.ac.cn。

反演方法的可靠性。目前,GRACE 数据多应用于全球及区域大空间尺度,但对人口高度密集的城市化区域关注较少。京津冀、长三角和珠三角城市群作为我国沿海最重要的 3 个城市群,尚缺乏长时间序列地下水储量动态变化及影响因素的定量评估与对比分析。

地下水储量变化主要受气候变化和人类活动的影响,在人口密集的城市地区,地下水开采增加主要是由于用水需求量增大。自 1980 年代以来,随着快速的城市化,全球用水量以每年约 1% 的速度增长,地下水被大量开采以支持城市发展^[17-19]。例如约旦伊尔比德省,饮用水、城市用水和农业用水需求的增加导致其地下水需求量在过去的 40 a 间增加了 227%^[20]。在资源型缺水的京津冀城市群,由于地表水资源匮乏,地下水供给了总用水量的 70% 以上。而在地表水资源丰富的长三角和珠三角城市群,经济高速发展引发了严重的地表水污染,水质型缺水导致洁净地下水的开发强度不断增大^[21]。如珠三角广花盆地的地下水开采机井在 1982—1996 年间增加了 2 倍多^[22]。由于不同的自然条件、地理区位、发展历史以及城市化模式,京津冀、长三角与珠三角城市群地下水储量变化的驱动机制尤为复杂。因此,全面解析与对比分析 3 个城市群地下水时空变化的关键驱动因素,有助于进一步促进城市群地区地下水资源的科学管理与保护。

本研究以京津冀、长三角和珠三角城市群为研究案例,结合 GRACE 卫星数据、全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system,GLDAS)和全球水文与水资源模型(watergap global hydrology model,WGHM)定量反演了 2002—2016 年间其地下水储量的年际变化特征,并利用灰色关联分析方法定量解析了多种自然与社会经济因素对地下水储量

变化的影响程度,揭示我国东部沿海典型城市群地下水储量变化特征及关键驱动因素。

1 研究区概况及其数据源

1.1 研究区域

京津冀、长三角和珠三角城市群均位于中国东部沿海,以占全国 5.01% 的区域面积承载了全国 21.75% 的人口和 39.12% 的国内生产总值(gross domestic product,GDP)(2016 年),是中国人口集聚最多、经济规模最大、综合实力最强的 3 个城市群。其中,京津冀城市群位于华北平原北部,年均降水量为 505 mm,共包括 13 个城市,核心城市有北京、天津和石家庄;长三角城市群位于长江下游,年均降水量为 1 278 mm,共包括 26 个城市,核心城市包括上海、南京、杭州和合肥;珠三角城市群位于广东省中南部沿海,年均降水量为 1 827 mm,共包括 9 个城市,核心城市为广州。作为中国城市化程度最高的地区,2016 年 3 个城市群的人口城镇化率由高到低分别为 84.85%(珠三角)、70.53%(长三角)与 63.88%(京津冀),远高于全国同期平均水平(57.35%)。同时,3 个城市群的人均 GDP 由高到低分别为 11.43 万元(珠三角)、10.62 万元(长三角)与 6.77 万元(京津冀),均明显高于全国平均水平(5.38 万元)。人口和社会经济的快速发展对水资源有着巨大的需求。以 2016 年为例,京津冀、长三角和珠三角的地表水资源量分别占全国的 0.47%、6.67% 和 2.40%,而用水量却分别占全国的 4.01%、13.91% 和 3.53%。开采地下水成为这些地区弥补地表水资源短缺的主要途径。各城市群自然和社会经济情况具体如表 1 所示。

表 1 2016 年城市群自然和社会经济指标
Tab. 1 Natural and socio – economic indicators of urban agglomerations in 2016

指标类别	指标	京津冀	长三角	珠三角	全国
自然特征	陆地面积/(10 ⁴ km ²)	21.58	21.11	5.40	959.70
	年均降水量(2002—2016 年)/mm	505.08	1 278.05	1 827.27	637.28
	单位面积水资源量/mm	120.40	1 041.41	1 397.04	338.20
	单位面积地表水资源量/mm	67.52	988.54	1 389.63	325.77
	单位面积地下水资源量/mm	83.17	164.89	309.38	92.24
人口	总人口/万人	11 205.07	12 875.26	5 998.49	138 271.00
	人口城镇化率/%	63.88	70.53	84.85	57.35
	人口密度/(人/km ²)	519.16	657.40	1 099.77	144.10
	人口增长率(2002—2016 年)/%	22.16	15.88	27.01	7.64
土地	城市建成区面积/km ²	4 043.00	6 189.00	4 113.00	42 832.00
	城市建成区面积占比/%	1.87	2.93	7.62	0.45
	城市建成区面积增长率(2002—2016 年)/%	80.33	128.04	186.42	115.84

(续表)

指标类别	指标	京津冀	长三角	珠三角	全国
经济	总 GDP/亿元	75 820.51	147 414.92	67 841.85	744 127.20
	人均 GDP/万元	6.77	10.62	11.43	5.38
	人均 GDP 增长率(2002—2016 年)/%	433.98	446.11	458.41	559.69
	第一产业 GDP 占比/%	5.22	3.41	1.78	8.56
	第二产业 GDP 占比/%	37.57	43.25	42.15	39.81
	第三产业 GDP 占比/%	57.21	53.34	56.07	51.63
	第一产业 GDP 增长率(2002—2016 年)/%	231.10	200.07	124.86	295.05
	第二产业 GDP 增长率(2002—2016 年)/%	447.29	434.97	506.29	453.29
	第三产业 GDP 增长率(2002—2016 年)/%	730.56	710.56	782.04	993.63

1.2 研究数据

1.2.1 GRACE 和水文模型数据

本文选取了 GRACE RL06 模型的月度陆地水储量距平(terrestrial water storage anomalies,TWSA)产品(<http://www2.csr.utexas.edu/grace>),即陆地水储量相对值,空间分辨率为 0.25° × 0.25°。研究时间段为 2002 年 4 月—2016 年 12 月,这期间 GRACE 缺失了 19 个月的数据(2002 年 6 月、7 月,2003 年 6 月,2011 年 1 月、6 月,2012 年 5 月、10 月,2013 年 3 月、8 月、9 月,2014 年 7 月、12 月,2015 年 6 月、10 月、11 月,2016 年 4 月、9 月、10 月),通过线性插值进行填补^[11, 23]。

此外,使用 GLDAS 和 WGHM 数据获取陆地水的组分信息。GLDAS-2/NOAH 模型的月度产品提供了土壤蓄水量和冰雪蓄水量数据(<https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=GLDAS>),空间分辨率为 0.25° × 0.25°。WGHM 2.2d 模型的月度产品提供了湿地、湖泊、河流和水库 4 类地表水体蓄水量数据(<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.918447>),将这 4 类水体之和作为地表水蓄水量,空间分辨率为 0.5° × 0.5°,需进行重采样以匹配 GRACE 数据。

1.2.2 自然与人为因素数据

针对 3 个城市群的自然与社会经济特征,以及地下水开发利用情况,结合相关文献^[24],从自然因素、用水量、经济因素以及人口因素 4 个方面,共计选取了 13 个驱动因素指标(表 2):①自然因素,包括降水量、地表水资源量及蒸散量 3 个指标;②用水量,包括总用水量及各部门用水量等 4 个指标;③经济因素,包括总 GDP、各产业 GDP 及人均 GDP 等 5 个指标;④人口因素,选取总人口数量 1 个指标。各城市群自然与社会经济统计数据由其所包含的地级市数据求和得到,各地级市数据大部分来源于其所属省份的水资源公报及统计年鉴,部分数据来源于该地级市的水资源公报。此外,本文采用农业用水作为第一产业用水,工业用水作为第二产业用水,将《中国城市建设统计年鉴》城市供水中的

“公共服务用水”与“其他用水”之和作为第三产业用水^[25],用于产业与用水结构分析。其中,产业结构利用 3 个产业 GDP 占总 GDP 的比重衡量,用水结构使用 3 个产业用水量占各产业用水总量的比重衡量。

表 2 地下水变化驱动因素指标

Tab.2 Indicators of driving factors affecting GWS change

指标类型	指标	数据来源	指标类型	指标	数据来源
自然因素	降水量/mm	水资源公报	经济因素	总 GDP/亿元	统计年鉴
	地表水资源量/亿 m ³			第一产业 GDP/亿元	
	蒸散量/mm			GLDAS	
用水量	总用水量/亿 m ³	水资源公报		第三产业 GDP/亿元	
	农业用水量/亿 m ³			人均 GDP/亿元	
	工业用水量/亿 m ³		人口因素	总人口数量/万人	
	生活用水量/亿 m ³				

2 研究方法

2.1 基于 GRACE 的地下水储量变化反演方法

根据陆地水量平衡原理,陆地水由地表水、地下水、积雪冰盖、土壤水及生物含水(通常忽略不计)构成。因此,地下水储量距平(groundwater storage anomalies,GWSA)可表示为^[16]:

$$GWSA = TWSA - SWA - SMA - SNA \quad , \quad (1)$$

式中:GWSA 为地下水储量距平,即地下水的相对储量,通常使用等效水高表示,cm;SWA,SMA 和 SNA 分别为 WGHM 模型提取的地表水蓄水量、GLDAS 模型提取的土壤蓄水量和冰雪蓄水量的距平值。为了与 TWSA 进行一致的比较,需分别计算相同基线时间(2004 年 1 月—2009 年 12 月)内地表水、土壤以及冰雪蓄水量的平均值,并从各自相应的时间序列中减去该值,以获取距平值^[26]。

地下水储量变化 ΔGWS 由 GWSA 对时间 t 求导数计算得到^[27],即

$$\Delta GWS(t) \approx \frac{dGWSA}{dt} \approx \frac{GWSA(t) - GWSA(t - 1)}{\Delta t} \quad (2)$$

2.2 精度验证

本文利用实测地下水位数据,通过双变量相关法验证 GWSA 估算的精度。由于长三角和珠三角地区的地下水监测站较少,分布稀疏且不均匀,而京津冀地区地下水监测站较多且分布均匀,因此,本研究以京津冀城市群为例进行精度验证。在京津冀地区选取了 90 个国家级监测站,这些站点在 2005—

2016 年间持续提供地下水年均埋深数据,数据来源于《中国地质环境监测地下水位年鉴》。为了与 GRACE 数据保持一致,计算所有站点地下水年均埋深的距平值(即地下水储量距平值的等效水高),并取平均值作为该区域的地下水储量距平实测值。

2.3 滑动平均分析

滑动平均模型是时间序列分析的基本方法,用确定时间序列的移动平均值来显示变化趋势^[28]。对于时间序列 $X = \{x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$,其时间 t 处的变化速度 $V(t)$ 计算为:

$$V(t) = \frac{1}{2m} \left[\sum_{k=t+1}^{t+m} x(k) - \sum_{k=t-m}^{t-1} x(k) \right], t = m + 1, \dots, n - m \quad (3)$$

式中: m 为移动长度,一般为奇数,本文取 $m = 3$,即选用 3 a 滑动平均; n 为序列时间长度, k 和 t 为时间节点,本文研究时间段为 2002—2016 年,共 15 a,因此 $n = 15, k = 1, 2, \dots, 15$,考虑滑动平均趋势分析存在端部效应^[29],因此不考虑前 3 a 和后 3 a 的分析,即 $t = 4, \dots, 12$ 。

2.4 灰色关联分析

灰色关联分析方法通过对系统的动态发展态势做定量比较分析,进而衡量不同时空序列数据间的关联程度,其基本思想是通过确定参考数列 $Y = \{y(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$ 和若干比较数列 $X_i = \{x_i(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}, i = 1, 2, \dots, m$ 的几何形状相似程度来判断其联系是否紧密,以及关联强

度^[30-31]。本研究将 2002—2016 年间地下水储量变化的时间序列作为参考数列,各驱动因素的时间序列作为比较数列。对各序列分别进行初值化处理以统一量纲。灰色关联度计算公式为:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (4)$$

式中: r_i 为第 i 个驱动因素与地下水储量变化间的灰色关联度,其值越接近 1,关联程度越高,一共选取了 13 种驱动因素,因此 $i = 1, 2, \dots, 13; \xi_i(k)$ 为关联系数,即参考数列与比较数列在各时间点的关联程度值。其公式为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|} \quad (5)$$

式中 ρ 为分辨系数,其值越小,分辨力越强,通常取 $\rho = 0.5$ ^[32-33]。

3 结果与分析

3.1 3 个城市群地下水储量时空变化特征

GRACE 反演结果与站点实测数据吻合较好。2005—2016 年间,京津冀城市群地下水储量反演结果与实测数据间的 Pearson 系数达 0.95 ($p < 0.01$) (图 1),表明了本研究结果的可靠性。2002—2016 年,3 个城市群地下水储量呈现不同的变化趋势。如图 2(a) 所示,纵坐标轴表示 GWSA 值,正值表示该年份地下水储量大于基线时间内的平均水平,负值则相反。反演结果表明,2002—2016 年间,京津冀城市群地下水储量持续下降,下降幅度为 19.36 cm,线性下降速率达 1.17 cm/a ($p < 0.001$); 长三角城市群 GWSA 值在 -2.47 ~ 2.15 cm 的范围内波动变

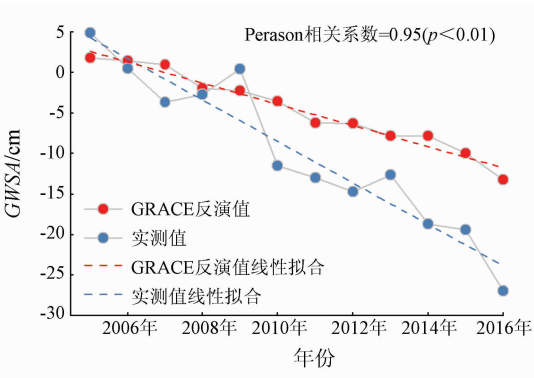


图 1 京津冀城市群 GRACE 反演与实测地下水储量距平变化比较
Fig. 1 Comparison between GRACE-derived and in situ groundwater storage anomalies of BTH urban agglomerations

化,较为稳定; 珠三角城市群整体呈上升趋势,上升幅度为 8.39 cm,线性上升速率为 0.43 cm/a ($p < 0.001$)。不同年份各城市群地下水储量变化速度

有所不同(图 2(b))。其中,京津冀城市群在 2006—2010 年间加速下降,下降速率从 1.26 cm/a 增加到 2.85 cm/a,而后有所放缓。长三角城市群在 2008—2012 年间地下水储量变化速度由上升

(0.66 cm/a) 转为加速下降(0.95 cm/a)。珠三角城市群在 2007—2011 年间加速上升,上升速率从 0.10 cm/a 增加到 1.94 cm/a,而后放缓。

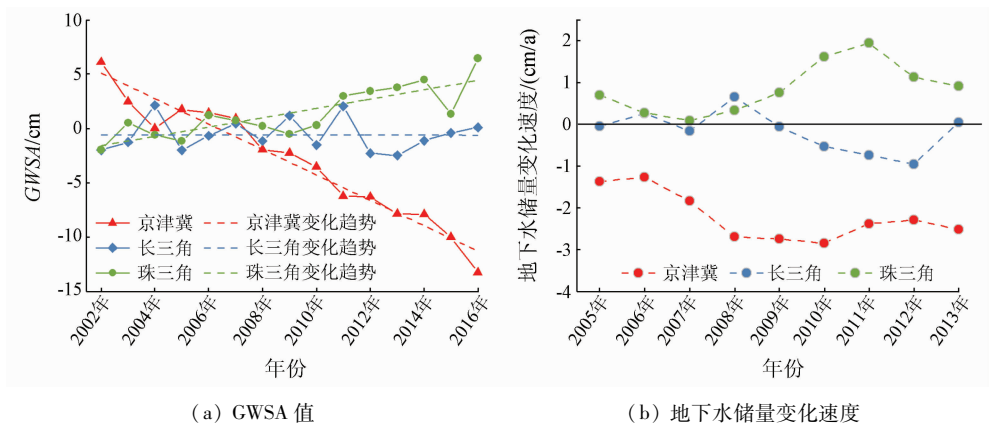


图 2 3 个城市群地下水储量距平及其变化速度时间序列
Fig. 2 Time series of groundwater storage anomalies and change rate of three urban agglomerations

3 个城市群地下水储量变化的明显差异,反映了不同城市群地下水采补模式不同。其中,京津冀城市群地下水持续下降主要是因为地下水开采量长期高于补给量。例如,2002—2016 年,京津冀城市群年均地下水供水量为 180.43 亿 m³,达到了降水量的 16.55%,而京津冀城市群所在的华北平原多年平均降水入渗补给系数为 0.13^[34],地下水自然补给量不足以平衡开采量。2010 年后,京津冀城市群地下水下降速率有所放缓,是由于地下水的开采得到了一定的控制。例如,京津冀城市群地下水供水量在 2010—2016 年间减少了 22.86% (41.85 亿 m³),减少量是 2002—2010 年间的 2 倍多。长三角城市群通过减少开采和增加补给稳定地下水储量。例如,地面沉降问题突出的上海市在 2002—2016 年间减少了 96.39% 的地下水供水量,同时人工回灌

地下水 2.67 亿 m³。珠三角城市群地下水持续上升是由于补给充足,并且开采持续减少。例如,2002—2016 年间,珠三角年均地下水供水量为 2.41 亿 m³,仅占降水量的 0.24%,而珠三角广花盆地的降水入渗补给系数为 0.045 ~ 0.26^[35],自然补给十分充足,同时地下水供水量在 15 a 间减少了 53%。因此,对于地下水采补依然失衡的京津冀城市群,除控制开采外,还应重视开展人工回灌,从“节流”和“开源”2 方面同时入手,充分利用南水北调水源进行地下水涵养。自 2018 年开展地下水回补工作以来,京津冀城市群部分地区地下水量已有了一定的回升^[36]。

从城市群内部来看(图 3),京津冀城市群不同城市间的地下水储量变化速率差异最大(标准差为 0.38),其次为长三角(标准差为 0.20)和珠三角城

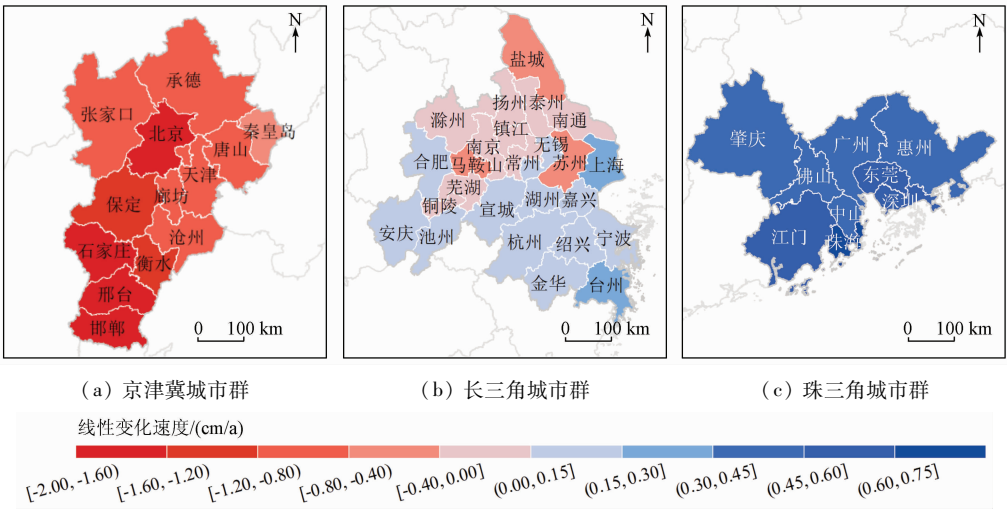


图 3 2002—2016 年 3 个城市群内部地下水储量线性变化速度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of linear rate of groundwater change in the cities of urban agglomerations during 2002—2016

城市群(标准差为 0.08)。京津冀城市群内部所有城市的地下水储量均呈下降趋势,南部城市下降比北部更严重。其中,邯郸下降最快(1.87 cm/a, $p < 0.001$),其次为石家庄(1.83 cm/a, $p < 0.001$)、北京(1.64 cm/a, $p < 0.001$)和邢台(1.61 cm/a, $p < 0.001$),这些城市地下水供给量较大,占整个京津冀城市群的 41.47%(2002—2016 年)。长三角内部整体呈南部微升、北部微降的趋势。其中,南部的台州上升最快(0.24 cm/a, $p < 0.1$);北部的马鞍山下降最快。这也与地下水供水量变化相关,台州地下水供水量在 2002—2016 年间下降了 80.75%,而马鞍山增加了 350%。珠三角内部各城市均呈上升趋势,东南部城市上升趋势相对西北部更为显著,但整体来看各城市差异不大。

3.2 3 个城市群地下水储量时空变化的驱动因素

灰色关联分析结果表明,2002—2016 年间,3 个城市群地下水储量变化主要受用水量指标的影响,自然因素次之,再次为人口因素,经济因素相对最弱。用水量因素中,农业用水量影响最强,在 3 个城市群中均居首位;自然因素中,降水量的影响较强。

对于京津冀和珠三角城市群,农业、工业、生活以及总用水量与地下水储量变化的关联度均高于自然因素。其中,京津冀城市群受农业用水的影响尤为突出,关联度高达 0.85。长三角城市群的农业用水量、降水量、地表水资源量和总人口数量等要素的关联度相近(均在 0.83 ~ 0.84 之间),表明长三角城市群地下水储量变化受多种因素综合影响。珠三角城市群受农业和生活用水量双重主导,关联度均高达 0.85(图 4)。研究结果说明在这 3 个城市群,人类活动均在地下水变化中占主导地位。

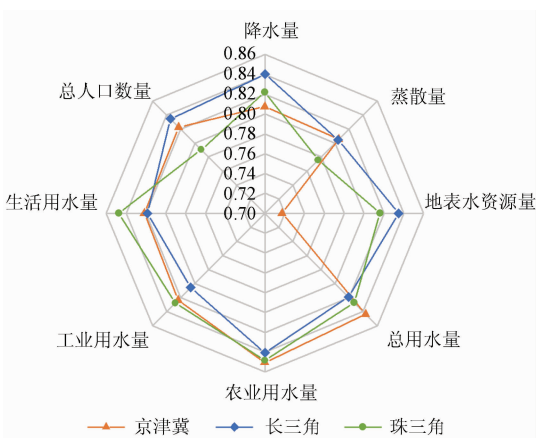


图 4 3 个城市群地下水储量变化主要驱动因素关联度
Fig.4 Correlation degree of main driving factors for groundwater changes in three urban agglomerations

驱动因素分析结果表明,提高农业用水效率和防治地表水污染是 3 个城市群地下水保护中需要共

同关注的重点。虽然城镇化是推进京津冀、长三角与珠三角城市群发展的主要引擎,但农业发展是保障粮食安全的根本,也是区域发展的重要方面之一。农业因耗水量大而成为影响 3 个城市群地下水储量变化的首要因素。其中,农业部门是京津冀城市群地下水的主要供给对象,例如,2002—2016 年间,农业消耗了河北省地下水开采量的 75.02%。尽管京津冀城市群的农业用水占比从 2002 年的 66.95% 下降到了 2016 年的 58.08%,但仍然超过半数。相比之下,长三角与珠三角城市群农业用水量占比明显低于京津冀城市群,分别为 38.58% 与 32.66%(2016 年),但它们的农业用水效率却明显低于京津冀城市群。例如 2002—2016 年间,长三角和珠三角城市群的年均万元农业 GDP 用水量分别为 991.24 m³ 和 1 080.48 m³,明显高于京津冀城市群的 600.39 m³。而京津冀城市群的农业用水效率与发达国家相比依然有一定的差距,如 2019 年河北省的农田灌溉水有效利用系数为 0.67^[37],而以色列已经达到了 0.87^[38]。因此,缩小城市群之间的农业节水技术差距,全面提升农业用水效率,是进一步修复与保护城市群地下水资源的有效途径。

对于地表水资源丰富的珠三角城市群,生活用水量的显著影响主要是由于生活用水对水质要求较高,而地表水严重污染引发水质型缺水,导致了地下水开采强度的加大。珠三角城市群的地下水主要用于供给居民生活^[22],例如 2002 年,广州市和惠州市的地下水供水中,生活用水占比分别达 100% 和 60%^[39]。同样,水质型缺水也是长三角城市群地下水超采的重要原因。例如长三角的杭嘉湖地区,在 20 世纪 70 年代前地下水年开采量不超过 0.2 亿 m³,而自 80 年代—2005 年,乡镇企业兴起,工业污水严重污染地表水^[40],导致该地区累计地下水开采量高达 33.3 亿 m³^[21]。对于资源型缺水的京津冀城市群,地表水污染更加加重了对地下水的依赖。因此,防治地表水污染对于 3 个城市群地下水保护至关重要。

3.3 3 个城市群发展与地下水储量变化趋势的启示

对比分析 3 个城市群地下水储量时空变化趋势及其影响因素,结果表明,产业结构的优化调整与升级对于地下水资源的保护具有关键性作用。因此,推进区域产业结构调整、优化用水结构、提升用水效率、降低用水量是我国东部沿海城市群实现地下水资源长效保护的核心战略任务。

从用水结构与产业结构的协调性来看,3 个城市群之间存在明显差异。其中,珠三角城市群产业结构与产业用水结构间的协调程度最高,其次为长三角城市群,京津冀城市群相对最差。2016 年,京

京津冀城市群第一产业用水量占比最高(77.22%),而第一产业 GDP 占比仅为 5.22%,3 个产业的产值结构与其用水结构明显不协调。相比而言,长三角和珠三角城市群第二产业用水量占比最高,分别为 52.52%和47.72%,同时第二产业 GDP 占比分别为

43.25%和42.15%,产业结构与用水结构协调程度相对较高(图 5)。因此,对于第一产业用水量占比最大的京津冀城市群,在保障粮食安全的前提下,降低农业用水对地下水的依赖对于保护地下水资源非常重要。

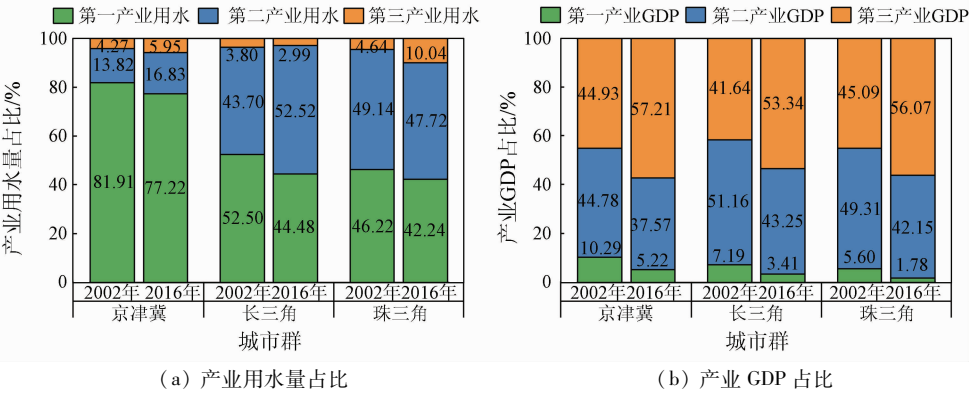


图 5 2002 年与 2016 年 3 个城市群用水结构及产业结构对比

Fig. 5 Comparison of water use and industry proportions of three urban agglomerations in 2002 and 2016

从用水投入与经济产出的比值与变化来看,3 个城市群各产业用水效率存在明显差异,但均有明显提升(图 6)。2002—2016 年,京津冀城市群 3 个产业用水效率均最高;长三角城市群的第一产业和第二产业用水效率相对最低,平均万元第一产业和第二产业 GDP 用水量分别为京津冀的 1.8 倍和 4.64 倍;珠三角城市群的第三产业用水效率相对最低,平均万元第三产业 GDP 用水量为京津冀的 1.73

倍。因此,长三角城市群亟待进一步提高第一和第二产业用水效率,而珠三角城市群需加快提高第三产业用水效率。此外,从用水效率的变化来看,3 个城市群 3 个产业用水效率均有大幅提高,但也存在明显差异。例如,2002—2016 年间,3 个城市群 GDP 增长率最高的产业均为第三产业,其中,珠三角城市群第三产业 GDP 增长率最高(782.04%),第三产业用水量同时增加了 76.63%,用水效率提升了

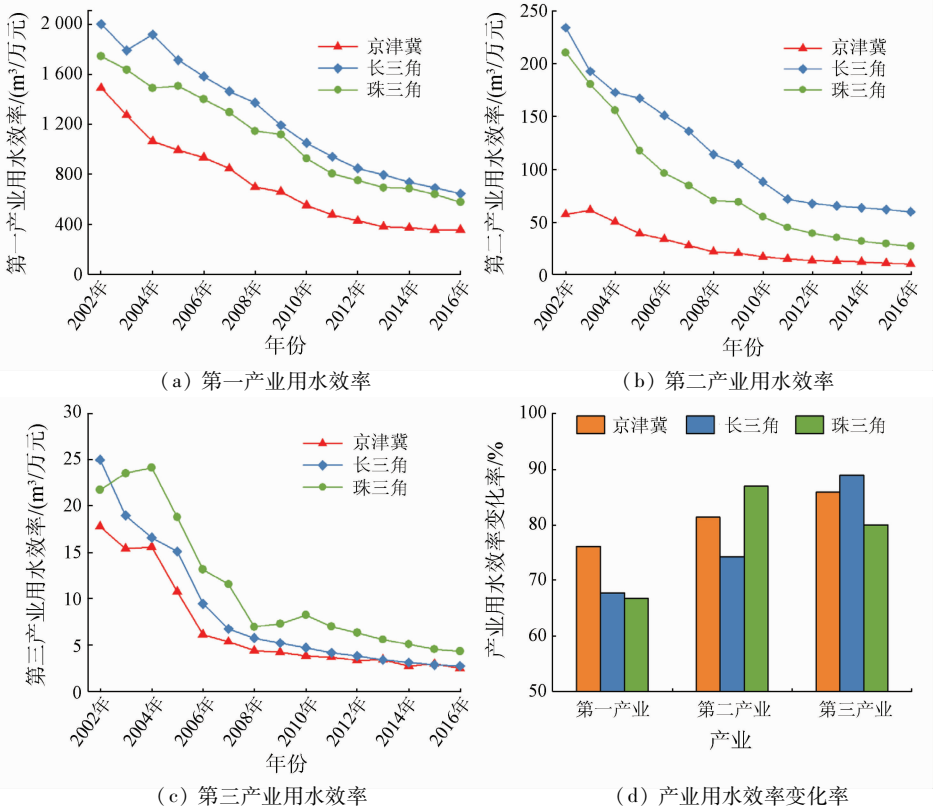


图 6 2002—2016 年 3 个城市群用水效率演变

Fig. 6 Change of water use efficiency in three urban agglomerations during 2002—2016

79.98%；而京津冀和长三角城市群虽然第三产业 GDP 增长相对较缓(分别为 730.56% 和 710.56%)，但第三产业用水量分别增加 16.81% 和减少 10.09%，用水效率分别提升了 85.94% 和 88.91%。即珠三角城市群第三产业经济发展最快，但用水效率提升相对最低。因此，我国东部沿海城市发展战略规划中，要统筹规划 3 个城市群之间产业用水效率控制指标，进而全面促进东部沿海地区的水资源保护。

4 结论

本文结合 GEACE 卫星及水文模型数据，实现了对 2002—2016 年间中国东部沿海 3 个城市群地下水储量变化的定量反演，并采用灰色关联分析方法从气候变化和人类活动 2 方面探究了地下水储量变化的驱动力，为 3 个城市群的地下水资源管理与保护提供了科学指导。主要结论如下：

1) 京津冀、长三角和珠三角城市群的地下水储量在 2002—2016 年间展现出了截然不同的变化趋势。京津冀持续下降，线性下降速率为 1.17 cm/a；长三角呈小幅度波动变化，较为稳定；珠三角持续上升，线性上升速率约为 0.43 cm/a。

2) 3 个城市群的地下水储量变化主要受人类活动影响。农业用水作为首要驱动力，表明了平衡城市化和农业发展用水需求对区域尺度地下水保护至关重要。此外，需重视水污染防治，提升地表水资源的可用性，以压减地下水开采。

3) 3 个城市群的发展促进了区域产业结构的调整与升级，提高了用水效率，优化了用水结构，对减缓地下水的开采具有一定的积极作用。各城市群之间，以及城市群内部不同城市之间的产业结构、用水结构及效率等差异较大。京津冀城市群应着力推进不同地区产业结构的协同发展，进而优化用水结构。长三角和珠三角城市群应重视用水效率的提升。

此外，本研究还存在一些不足，如受 GRACE 数据获取时间的限制，无法研究更长时间序列的地下水储量变化。近年来，我国出台了一系列严格的地下水保护政策，未来有必要采用新数据(如 GRACE-FO 卫星数据)，进一步评估这些政策的有效性，以为政策调整和制定提供科学支撑。

参考文献 (References) :

[1] Jakeman A J, Barreteau O, Hunt R J, et al. Integrated groundwater management: An overview of concepts and challenges[M]// Jakeman A J, Barreteau O, Hunt R J, et al. Integrated groundwater man-

agement: Concepts, approaches and challenges. Cham: Springer International Publishing, 2016: 3 – 20.

[2] Jin S, Feng G. Large – scale variations of global groundwater from satellite gravimetry and hydrological models, 2002—2012 [J]. Global and Planetary Change, 2013, 106: 20 – 30.

[3] Ye S, Xue Y, Wu J, et al. Progression and mitigation of land subsidence in China[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24 (3) : 685 – 693.

[4] Dong S, Samsonov S, Yin H, et al. Time – series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(3) : 677 – 691.

[5] Brunori C, Bignami C, Albano M, et al. Land subsidence, ground fissures and buried faults: InSAR monitoring of Ciudad Guzmán (Jalisco, Mexico) [J]. Remote Sensing, 2015, 7(7) : 8610 – 8630.

[6] 郭坤一, 于军, 方正, 等. 长江三角洲地区地下水资源与地质灾害调查评价[C]//“十五”重要地质科技成果暨重大找矿成果交流会材料二——“十五”地质行业获奖成果资料汇编. 北京: [s. n.], 2006: 142 – 143.

Guo K Y, Yu J, Fang Z, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources and geological hazards in the Yangtze River Delta Region [C]//“Tenth Five – Year Plan” Important Geological Science and Technology Achievements and Major Prospecting Achievements Exchange Meeting Material II: “Tenth Five – Year Plan” Geological Industry Award – Winning Achievements Data Compilation. Beijing: [s. n.], 2006: 142 – 143.

[7] 喻永平, 林鸿, 王会强. 利用时序 InSAR 技术监测广花盆地地面沉降[J]. 测绘通报, 2015(1) : 157 – 159.

Yu Y P, Lin H, Wang H Q. Using time series InSAR technology to monitor land subsidence in Guanghua Basin [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(1) : 157 – 159.

[8] Conway B D. Land subsidence and earth fissures in south – central and southern Arizona, USA [J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24 (3) : 649 – 655.

[9] 高茂生, 骆永明. 我国重点海岸带地下水资源问题与海水入侵防控[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10) : 1197 – 1203.

Gao M S, Luo Y M. Change of groundwater resource and prevention and control of seawater intrusion in coastal zone [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10) : 1197 – 1203.

[10] Chen J, Famiglietti J S, Scanlon B R, et al. Groundwater storage changes: Present status from GRACE observations [J]. Surveys in Geophysics, 2016, 37(2) : 397 – 417.

[11] Yin W, Hu L, Zhang M, et al. Statistical downscaling of GRACE – derived groundwater storage using ET data in the North China Plain [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123 (11) : 5973 – 5987.

[12] Long D, Yang W, Scanlon B R, et al. South – to – North Water Diversion stabilizing Beijing’s groundwater levels [J]. Nature Communications, 2020, 11(1) : 3665.

[13] Frappart F, Ramillien G. Monitoring groundwater storage changes using the gravity recovery and climate experiment (GRACE) satellite mission: A review [J]. Remote Sensing, 2018, 10(6) : 829.

[14] 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.
- [15] Kalhor K, Emaminejad N. Sustainable development in cities: Studying the relationship between groundwater level and urbanization using remote sensing data[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2019, 9: 100243.
- [16] Gao F, Wang H, Liu C. Long-term assessment of groundwater resources carrying capacity using GRACE data and Budyko model[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: 125042.
- [17] Hua S, Jing H, Yao Y, et al. Can groundwater be protected from the pressure of China's urban growth? [J]. *Environment International*, 2020, 143: 105911.
- [18] Yar P. Urban development and its impact on the depletion of groundwater aquifers in Mardan City, Pakistan[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, 11: 100426.
- [19] Nath B, Ni-Meister W, Choudhury R. Impact of urbanization on land use and land cover change in Guwahati City, India and its implication on declining groundwater level[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, 12: 100500.
- [20] Odeh T, Mohammad A H, Hussein H, et al. Over-pumping of groundwater in Irbid governorate, northern Jordan: A conceptual model to analyze the effects of urbanization and agricultural activities on groundwater levels and salinity[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(1): 40.
- [21] 李文鹏, 王龙凤, 郭海朋, 等. 中国地面沉降防治成效与对策建议[J]. *中国水利*, 2021(7): 32-35.
- Li W P, Wang L F, Guo H P, et al. Effectiveness and countermeasures of land subsidence control in China[J]. *China Water Resources*, 2021(7): 32-35.
- [22] 陈慧川. 珠江三角洲地区地下水开发利用现状分析与建议[J]. *地下水*, 2011, 33(2): 38-40.
- Chen H C. Analysis and suggestions on the current situation of groundwater development and utilization in the Pearl River Delta[J]. *Groundwater*, 2011, 33(2): 38-40.
- [23] 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.
- [24] 赵玉峰, 罗专溪, 于亚军, 等. 京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1301-1313.
- Zhao Y F, Luo Z X, Yu Y J, et al. Spatio-temporal changes of groundwater level and its driving factors in a typical region of Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1301-1313.
- [25] 刘洋, 李丽娟. 京津冀地区产业结构和用水结构变动关系[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(2): 1-9.
- Liu Y, Li L J. The relationship between industrial structure and water consumption structure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2019, 17(2): 1-9.
- [26] Huang Z, Tang Q, Lo M H, et al. The influence of groundwater representation on hydrological simulation and its assessment using satellite-based water storage variation[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(8): 1218-1230.
- [27] Long D, Longuevergne L, Scanlon B R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1131-1151.
- [28] 周磊, 武建军, 吕爱峰, 等. 华北不同地表覆盖类型区干旱演变特征[J]. *地理研究*, 2012, 31(4): 597-607.
- Zhou L, Wu J J, Lyu A F, et al. Drought evolution of different land cover regions in North China[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(4): 597-607.
- [29] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. *火炮发射与控制学报*, 2001, 22(1): 21-23.
- Pei Y X, Guo M. The fundamental principle and application of sliding average method[J]. *Gun Launch and Control Journal*, 2001, 22(1): 21-23.
- [30] Wang Z, Li J, Liu J, et al. Is the photovoltaic poverty alleviation project the best way for the poor to escape poverty? A DEA and GRA analysis of different projects in rural China[J]. *Energy Policy*, 2020, 137: 111105.
- [31] Chen X, Jiang J, Lei T, et al. GRACE satellite monitoring and driving factors analysis of groundwater storage under high-intensity coal mining conditions: A case study of Ordos, northern Shaanxi and Shanxi, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(2): 673-686.
- [32] Reddy J J, Varaprasad B J S, Reddy P V. Multi-objective optimization of erosion parameters of erodible soils using Taguchi-based gray relation analysis[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(17): 1723.
- [33] Mo H. Comprehensive evaluation of flood and flood in the Yellow River Basin based on gray correlation analysis[J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2021, 9: 13-24.
- [34] 霍思远, 靳孟贵. 不同降水及灌溉条件下的地下水入渗补给规律[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(5): 6-13, 21.
- Huo S Y, Jin M G. Effects of precipitation and irrigation on vertical groundwater recharge[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2015, 42(5): 6-13, 21.
- [35] 柯志庭. 广花盆地地下水水位动态与降雨入渗补给研究[D]. 广州: 中山大学, 2013.
- Ke Z T. Research on groundwater level dynamics and rainfall infiltration replenishment in Guanghua Basin[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2013.
- [36] 王英虎, 郭世娟. 河北省地下水超采综合治理河湖地下水回补试点做法及成效[J]. *中国水利*, 2020(13): 35-36.
- Wang Y H, Guo S J. Pilot projects for controlling of groundwater over exploitation in Hebei Province by recharging water to aquifers near rivers and lakes[J]. *China Water Resources*, 2020(13): 35-36.
- [37] 位铁强. 聚焦目标任务 坚持综合施策 全力推进地下水超采综合治理[J]. *河北水利*, 2020(11): 6-7.
- Wei T Q. Focus on goals and tasks, adhere to comprehensive measures, and make every effort to promote comprehensive treatment of groundwater overexploitation[J]. *Hebei Water Resources*, 2020(11): 6-7.
- [38] 秦长海, 王亦宁, 邵自平, 等. 国外怎么节约用水[J]. *时事报告*, 2021(3): 56-57.
- Qin C H, Wang Y N, Shao Z P, et al. How to save water abroad[J]. *Current Affairs Report*, 2021(3): 56-57.

[39] 广东省地质环境监测总站. 广东省、香港、澳门特别行政区地下水资源评价报告[R]. 广东: 广东省地质环境监测总站, 2002.

Guangdong Provincial Geological Environment Monitoring Station. Evaluation report of groundwater resources in Guangdong Province, Hong Kong and Macao Special Administrative Regions [R]. Guangdong: Guangdong Provincial Geological Environment Monitoring Station, 2002.

[40] 刘 冬. 长三角地区地面沉降[J]. 地球, 2012(1): 148 – 149.

Liu D. Land subsidence in the Yangtze River Delta[J]. The Earth, 2012(1): 148 – 149.

Analysis of the groundwater storage variations and their driving factors in the three eastern coastal urban agglomerations of China

LIN Xuemin^{1,2}, LI Weifeng², WANG Hong³, MING Dongping¹, HAN Lijian²

(1. School of Information Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Research Center for Eco – Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Information Center of Ministry of Natural Resources, Beijing 100036, China)

Abstract: A series of geological disasters caused by groundwater overexploitation has severely restricted the sustainable development of the three eastern coastal urban agglomerations in China: Beijing – Tianjin – Hebei (BTH), Yangtze River Delta (YRD), and Pearl River Delta (PRD). To reveal the spatial – temporal dynamic variations and their driving factors of groundwater storage (GWS) in the three urban agglomerations, this study quantitatively inverted the GWS variations in the three urban agglomerations during 2002—2016 using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite data. Then, attribution analysis was made using the gray relational analysis method. The results are as follows. The GWS kept decreasing at a linear rate of 1.17 cm/a in BTH, was relatively stable with slight fluctuation in YRD, and continued to increase at a linear rate of 0.43 cm/a in PRD. The GWS variations in the three urban agglomerations were all dominated by anthropogenic factors. The BTH was significantly affected by agricultural water consumption; the YRD was affected by agricultural water consumption, precipitation, surface water availability, and population; the PRD was significantly affected by both agricultural and domestic water consumption. According to the comparative analysis of the GWS variations and their driving factors among the three urban agglomerations, the development of urban agglomerations promoted industrial restructuring and upgrades the secondary and tertiary industries, with water utilization efficiency and structure improved, thus playing a positive role in groundwater protection. Considering the natural resource capacity and development patterns of the eastern coastal urban agglomerations, the key to GWS protection and restoration is to scientifically plan agricultural development and further optimize industrial structure so as to improve water utilization efficiency and prevent surface water pollution.

Keywords: groundwater storage; groundwater utilization; urban agglomeration; GRACE; driving factor
(责任编辑: 陈 理)