

文章编号:1671-6833(2026)02-0136-09

# 基于 GRACE 的京津冀地区地下水干旱时空变化特征

李爱民<sup>1</sup>, 郭振强<sup>1</sup>, 兀泽坤<sup>2</sup>, 成子怡<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 地球科学与技术学院, 河南 郑州 450001; 2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213000)

**摘要:**针对京津冀地区因长期地下水超采、水资源供需失衡等因素引发的地下水资源短缺与干旱频发问题,探究了该地区地下水干旱的时空演变特征及其影响机制,旨在为该区域水资源的可持续管理提供科学支撑,助力京津冀地区实现高质量发展。采用2003年10月—2023年9月期间的重力恢复与气候实验卫星(GRACE)数据和全球陆面数据同化系统(GLDAS)数据,反演了京津冀地区的地下水储量变化(GWSA)。基于此构建了地下水干旱指数(GDI),后续结合游程理论识别了研究区的地下水干旱事件,并分析了地下水干旱的发生频率以及时空特征。最后,结合气象数据以及水资源公报等数据,进一步探讨了地下水干旱与各影响因素之间的关系。研究表明:①京津冀地区中部偏东区域的地下水干旱发生频率较高,东南沿线区域中度及以上程度的地下水干旱发生频率最高。②该地区地下水干旱事件集中发生在2014—2021年的8年间,呈现频次高、影响范围广但干旱强度相对较小的特征。③从季节性空间分布来看,东南沿线城市的秋季和春季干旱情况较为严重,夏季相对较轻,这一分布特征与3—5月和10—11月的农业灌溉活动有关。④从年际空间分布来看,自2014年降水量急剧减少后,地下水干旱情况逐渐加重,至2020年达到最严重程度,全区域出现大面积中度以上地下水干旱现象,2021年随着降水量大幅增加,地下水干旱情况有所缓解。⑤南水北调工程有效补给了京津冀地区的地表水储量,并促进了供水和用水模式的转变,在缓解地下水长期亏损中发挥了重要作用。

**关键词:**GRACE 重力卫星; 京津冀地区; 地下水干旱; 地下水储量; 游程理论

**中图分类号:**TV213;P641

**文献标志码:**A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2025.05.019

京津冀地区是中国的政治经济文化中心,在地理位置上远离大型水体,属于半干旱气候区。近年来,随着经济的发展和人口规模的扩大,使得该地区用水需求量持续增加,地下水资源短缺问题十分突出,严重制约了区域的可持续发展。因此,研究京津冀地区地下水干旱的时空变化特征,对于保障京津冀水资源安全、降低旱灾风险、促进区域协调发展具有重要的现实意义。

地下水干旱是一种特殊类型的干旱<sup>[1]</sup>,指在某一地区和某一特定时期内,缺乏地下水补给,导致地下水储量或地下水水头下降,从而表现出地下水资源的缺乏。地下水干旱的评估依赖于对地下水资源的准确监测。传统方法主要依靠地下水监测井进行,但这种方法存在诸多限制,如监测站点分布不均匀、数据记录不连续以及数据获取受限等问题。随

着卫星遥感技术的迅速发展,区域尺度的大规模地下水监测成为可能。2002年,美国航空航天局(NASA)和德国航空航天中心(DLR)联合开发了重力恢复与气候实验卫星(GRACE),该卫星通过精确测量地球重力场的变化,能够反演陆地水储量的变化,从而突破了传统地面观测在时空尺度上的局限,为地下水干旱的评估提供了新的技术手段<sup>[2-6]</sup>。

国内外众多专家学者基于GRACE数据提出地下水干旱指标并进行了相关研究,如栗晓玲等<sup>[7]</sup>基于GRACE卫星数据构建地下水干旱指数,用于评估西北地区地下水干旱随气候变暖和植被改善的状况;黄润泽等<sup>[8]</sup>利用GRACE/GRACE-FO数据和全球陆面数据同化系统(GLDAS)数据,构建了标准化地下水干旱指数,分析了黄河流域中游地下水干旱的时空演变规律;Zhou等<sup>[9]</sup>基于GRACE和GLDAS

**收稿日期:**2025-11-04;**修订日期:**2025-12-27

**基金项目:**河南省自然科学基金资助项目(242300421372);河南省科技攻关项目(232102320123)

**作者简介:**李爱民(1972—),男,山东菏泽人,郑州大学副教授,博士,主要从事遥感与地理信息科学方面的研究,E-mail: aiminli@zzu.edu.cn。

**引用本文:**李爱民,郭振强,兀泽坤,等. 基于GRACE的京津冀地区地下水干旱时空变化特征[J]. 郑州大学学报(工学版),2026,47(2):136-144. (LI A M, GUO Z Q, WU Z K, et al. Spatio-temporal variation characteristics of groundwater drought in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on GRACE data[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026,47(2):136-144.)

数据推导地下水干旱指数,评估了淮河流域的地下水干旱时空变化;Touati 等<sup>[10]</sup>基于 GRACE/GRACE-FO 数据构建地下水干旱指数,评估了北非西北撒哈拉含水层系统地下水干旱的严重性;Nigatu 等<sup>[11]</sup>利用由 GRACE 数据构建的地下水干旱指数研究了尼罗河流域的地下水干旱的传播动态;Karunakalage 等<sup>[12]</sup>利用由 GRACE 数据构建的干旱指数评估了韩国地下水干旱发生的频率和严重性。这些研究显示了 GRACE 卫星在监测地下水变化方面的强大能力,推动了地下水干旱评估技术的变革。

本文利用 2003 年 10 月—2023 年 9 月期间 GRACE RL06 质量块 (Mascon) 数据和 GLDAS 模型数据,反演京津冀地区的地下水储量及其变化,构建基于 GRACE 数据的地下水干旱指数,分析该地区地下水干旱的时间演变和空间分布特征,并探究影响地下水干旱的主要因素,旨在为京津冀地区的地下水干旱遥感监测和水资源管理提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

图 1 为京津冀地区地貌示意图,底图源于自然资源部标准地图服务系统,底图审图号为 GS (2024)0650 号。京津冀地区是中国政治、文化和经济中心,是环渤海经济圈的核心,包括北京、天津和河北 3 个省级行政区,拥有约  $1.1\times 10^8$  常住人口,占全国总人口的 7.9%。该地区位于华北平原北部,地理坐标东经  $113^{\circ}27'\sim 119^{\circ}50'$ ,北纬  $36^{\circ}05'\sim 42^{\circ}40'$ ,总面积约  $21.67\times 10^4\text{ km}^2$ ,占全国陆域面积的 2.29%。

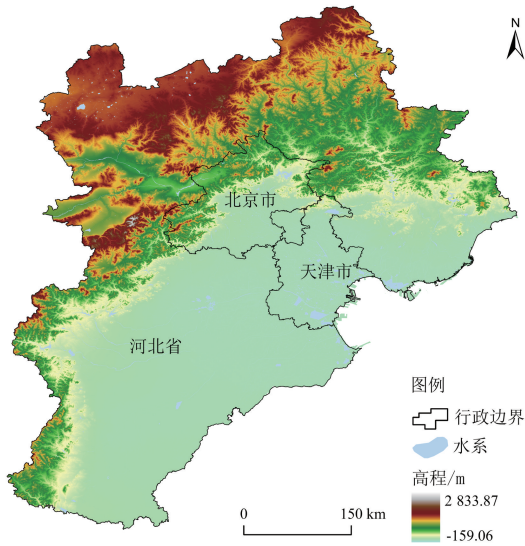


图 1 京津冀地区地貌示意图

Figure 1 Geomorphologic map of the Beijing-Tianjin-Hebei Region

该地区东临渤海,北依燕山山脉,南接太行山,西与山西省相邻,由于燕山、太行山以及内蒙古高原的地形影响,呈现出西北高、东南低的地势特点。在气候上,该地区属于暖温带大陆性季风气候,季节变化明显,冬季寒冷干燥,夏季炎热潮湿且多雨,春秋季节温和,雨水相对较少,河流季节性干涸现象较为普遍。

1.2 数据与预处理

1.2.1 GRACE 数据

采用了 GRACE 重力卫星的 3 种质量块处理方案产品,包括来自得克萨斯大学空间研究中心 (CSR) 的质量块格网数据产品 (CSR-M),喷气推进实验室 (JPL) 的质量块格网数据产品 (JPL-M),以及戈达德太空飞行中心 (GSFC) 的质量块格网数据产品 (GSFC-M)。其中,CSR-M 数据产品的格点大小为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,而 JPL-M 和 GSFC-M 数据产品的格点大小为  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。所有产品数据的时间分辨率均为月尺度。为了便于比较和分析,后两种产品数据经过重采样处理,使其空间分辨率与 CSR-M 产品保持一致。

3 种质量块处理方案产品都提供了陆地水储量变化 (TWSA) 数据。研究时间范围设定为 2003 年 10 月—2023 年 9 月,共计 240 个月。对于数据集中缺失的部分月份,采用相邻月份均值法进行插补。特别地,对于数据集中缺失的 2017 年 7 月—2018 年 5 月这一连续 11 个月的数据,利用 Zhong 等<sup>[13]</sup>发布的《中国区域基于降水重构陆地水储量变化数据集 (2002—2019)》进行填补,该数据集已经扣除了 2004 年 1 月 1 日—2009 年 12 月 31 日间的平均值,可以直接提取数据集中第 164~174 个月之间的数据作为间断期 TWSA 的估计。

1.2.2 GLDAS 数据

GLDAS 是由美国航空航天局 (NASA) 和国家海洋和大气管理局 (NOAA) 合作开发的。该系统基于 4 种陆面过程模型 (VIC、CLM、CLSM 和 Noah) 推出了 4 种数据产品。本研究使用了 CLSM 的输出数据,包括土壤水分 (SMSA)、植物冠层水 (CWSA)、雪水当量 (SWESA) 以及 Noah V2.1 模型输出数据中的蒸散发数据。其中,SMSA 为根区 ( $0\sim 100\text{ cm}$ ) 土壤水分数据。

CLSM 模型数据的空间分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为月尺度。为了保持研究时段的一致性,时间范围选取为 2003 年 10 月—2023 年 9 月。数据扣除 2004 年 1 月 1 日—2009 年 12 月 31 日间的平均值,并与 GRACE 数据相结合,用于反演地下

水储量的变化。

1.2.3 气象数据和地表数据

气象数据包括降水量和气温数据,地表数据涵盖数字高程模型 (DEM) 和归一化植被指数 (NDVI) 数据。降水量和气温数据基于英国东英吉利大学气候研究中心 (CRU) 发布的全球 0.5° 气候数据以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据。数据处理过程中采用了 Delta 空间降尺度方案,并利用 496 个独立气象观测点的数据进行了验证,以确保结果数据的可靠性。降水量数据的单位为 0.1 mm,而气温数据的单位为 0.1 ℃。NDVI 数据是由 NASA 发布的全球植被绿度数据集进行月度合成、镶嵌和裁剪后生成。这些数据均来源于国家地球系统科学数据中心,时间跨度为 2003 年 10 月—2022 年 12 月。DEM 数据来源于资源环境科学数据平台,基于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 (SRTM) 数据整理拼接生成,具有 90 m 空间分辨率。

1.2.4 水资源数据

水资源数据涵盖了 2004—2022 年期间京津冀地区历年的供水量、用水量以及调水量等关键指标,这些数据均源自各省市水利厅网站的公开发布。

1.3 研究方法

1.3.1 地下水干旱指数构建和分类方法

利用 TWSA 数据和 GLDAS 模型的地表水数据计算地下水储量变化,计算公式为

$$W_{GWSA} = W_{TWSA} - W_{SMSA} - W_{SWESA} - W_{CWSA} \quad (1)$$

式中:  $W_{TWSA}$  为陆地水储量变化;  $W_{SMSA}$ 、 $W_{SWESA}$  和  $W_{CWSA}$  分别为土壤水分、雪水当量和冠层水的变化。

本研究基于由 GRACE 数据和 GLDAS 模型反演的地下水储量变化数据,构建地下水干旱指数 (GDI)。该指数是一个无量纲值,计算公式为

$$GDI_{i,j} = \frac{GWSA_{i,j} - \overline{GWSA_j}}{\sigma_j} \quad (2)$$

式中:  $i, j$  分别为年份、月份;  $GWSA_{i,j}$  为  $i$  年  $j$  月的地下水储量变化;  $\overline{GWSA_j}$  和  $\sigma_j$  分别为  $j$  月地下水储量变化的均值与标准差。地下水干旱的发生通常较为缓慢,因此设定当  $GDI$  小于  $-0.8$  时,表示地下水发生干旱,干旱等级分类见表 1<sup>[14]</sup>。

1.3.2 游程理论

游程理论是一种用于分析时间序列的方法,它能够识别干旱历时、严重性和强度等干旱特征变量,从而揭示干旱的基本属性。本文运用游程理论对基于 GRACE 数据的  $GDI$  的干旱历时、干旱严重性

表 1 GDI 值及相应的地下水干旱分类  
Table 1 GDI value and corresponding groundwater drought classification

| 等级 | 分类   | GDI 范围                   |
|----|------|--------------------------|
| L1 | 无旱   | $-0.80 < GDI$            |
| L2 | 轻度干旱 | $-1.30 < GDI \leq -0.80$ |
| L3 | 中度干旱 | $-1.60 < GDI \leq -1.30$ |
| L4 | 重度干旱 | $-2.00 < GDI \leq -1.60$ |
| L5 | 极端干旱 | $GDI \leq -2.00$         |

和干旱强度进行识别。干旱历时是指一次干旱事件从发生到结束所持续的时间;干旱严重性则是指干旱事件持续时间内  $GDI$  指数的累计值的绝对值,干旱严重性除以干旱持续时间即为干旱强度。干旱事件的识别过程如下:

- (1) 当  $GDI$  值小于  $-0.8$ , 且持续时间超过 1 个月时,才视为发生了地下水干旱事件。
- (2) 当两个相邻的干旱过程时间间隔少于或等于 2 个月时,如果间隔期内的  $GDI$  值始终小于 0,则 将这两个相邻的干旱过程视为一次连续的地下水干旱事件,此时的干旱历时为两个干旱过程持续时间之和加上时间间隔;如果时间间隔超过 2 个月,则视为两个独立的干旱事件。

2 结果分析

本研究对比分析了 CSR-M、JPL-M 及 GSFC-M 3 种产品数据反演的陆地水储量变化,得出它们在空间分布和时间序列变化上具有一致性。为了降低数据的不确定性,对三者进行了集合平均计算。结合 GLDAS 数据,对 2003 年 10 月—2023 年 9 月期间的地下水储量变化进行反演计算,然后基于得到的水储量变化结果构建  $GDI$ ,下面对实验结果进行分析。

2.1 地下水干旱频率空间特征分析

干旱频率是用来表示研究区域内干旱事件发生的频繁程度,即在研究时段内发生干旱的月数占总月数的百分比。图 2 展示了京津冀地区地下水干旱发生频率的分布特征和空间差异。由图 2 可以看出,整个京津冀地区的大部分区域都经历了频率在 0.24 以上的地下水干旱现象,其中,频率在 0.28 以上的区域主要集中在中部偏东的位置;轻度地下水干旱的发生概率在穿过天津、北京和张家口 3 市的区域最高,并逐渐向周边地区降低;中重度以及极端地下水干旱发生概率最高的区域分布在研究区的东南沿线上,这些区域的概率呈现出自东南向西北逐渐降低的分布趋势。

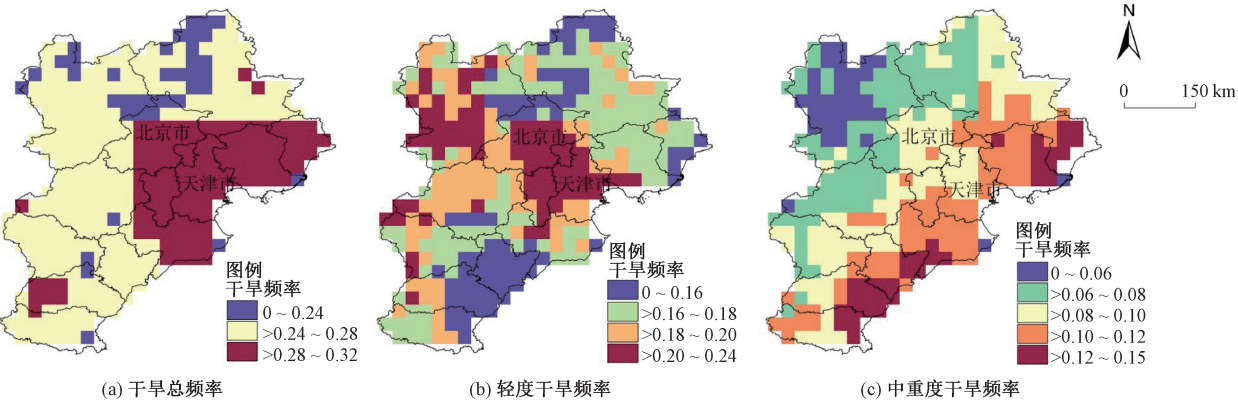


图2 干旱频率空间图

Figure 2 Spatial map of drought frequency

2.2 地下水干旱时空变化分析

基于游程理论,本文识别出了研究区出现的4次地下水干旱事件,如图3和表2所示。图3中阴影为游程理论识别的地下水干旱事件,这些事件的发生时间分别为:2014年12月—2015年2月、2015年8月—2016年2月、2016年6月—2016年7月以及2017年4月—2021年7月。相应地,这些干旱事件的持续时间分别为3个月、7个月、2个月和52个月。在严重性方面,这些事件的程度分别为2.70、7.91、1.80和60.44。干旱强度分别为0.90、1.13、0.90和1.16。值得注意的是,研究区有连续14个月的时间,干旱面积比例超过99%,其中GDI的最小值出现在2020年3月,为-1.83,对应的干旱面积比例为99.7%。

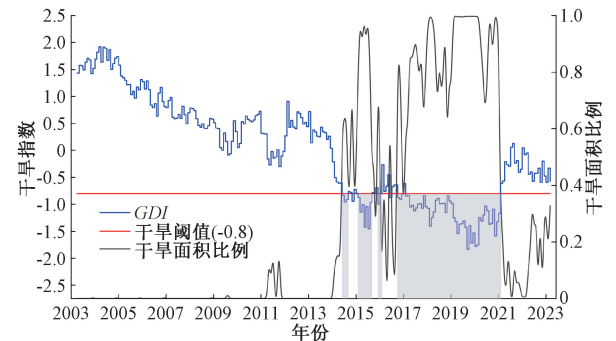


图3 京津冀地区GDI及干旱面积比例图

Figure 3 GDI and drought area proportion of Beijing-Tianjin-Hebei Region

表2 游程理论识别出的地下水干旱事件

Table 2 Groundwater drought events identified by run theory

| 干旱事件始末时间       | 持续时间/月 | 干旱严重性 | 干旱强度 |
|----------------|--------|-------|------|
| 2014.12—2015.2 | 3      | 2.70  | 0.90 |
| 2015.8—2016.2  | 7      | 7.91  | 1.13 |
| 2016.6—2016.7  | 2      | 1.80  | 0.90 |
| 2017.4—2021.7  | 52     | 60.44 | 1.16 |

总体来看,京津冀地区的地下水干旱事件在2014—2021年发生频繁。所有这些干旱事件的强度均属于轻度干旱级别,且在干旱事件发生期间,干旱面积比例普遍维持在60%以上。这反映出该地区地下水干旱的显著特征:频次高、影响范围广,但干旱强度相对较小。

图4展示了4次地下水干旱事件的干旱程度空间分布情况。分析得出:这4次干旱事件的空间分布各不相同,其中第2次干旱事件似乎是对第1次干旱事件的加剧;第1次和第2次干旱事件的重度区域主要集中在研究区的东部城市,表现为从秦皇岛市向周边城市扩散的趋势,而第4次干旱事件的重度区域则集中在研究区的东南部。

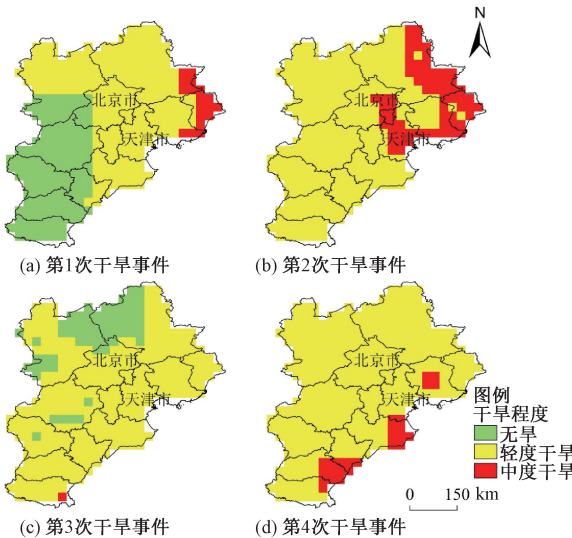


图4 4次地下水干旱事件的干旱程度空间分布图

Figure 4 Spatial distribution of drought degree for four groundwater drought events

通过查阅相关文献<sup>[15]</sup>了解到:秦皇岛市的年降水量自20世纪中叶以来一直呈现下降趋势,平均年降水量以17.06 mm/a的速率递减,2014年更是出

现了 352.00 mm 的最低降水量,远低于平均水平 642.30 mm;秦皇岛市的降水量存在显著的季节性差异,春秋冬 3 季的降水量占全年总降水量的比例不足 40%,其中春秋两季的比例相近,冬季的比例则不足 5%。因此,可以推断,降水量的减少导致秦皇岛市的水储量无法有效补充,长期处于枯竭状态。此外,降水量的季节性差异以及 2014 年的极端低降水量,可能是导致前两次干旱事件中秦皇岛市干旱程度尤为严重的原因。

图 5 呈现了 2017 年 4 月—2021 年 7 月京津冀地区地下水干旱程度的季节性空间分布情况。分析得出:在 4 个季节中,全域均出现了轻度以上的干旱状况;在分布位置上,中度干旱存在差异,春季和秋季的中度干旱分布位置相似,均集中在东南沿线城市,但秋季的态势更为严重,夏季干旱情况相对较轻,表现为除唐山市中部为中度干旱外,其余区域均为轻度干旱,冬季中度干旱主要集中在研究区的东南部,包括衡水、邢台及邯郸市的部分区域。查阅资料<sup>[16]</sup>得知,这一分布特征可能与研究区在 3—5 月和 10、11 月的农业灌溉活动有关。

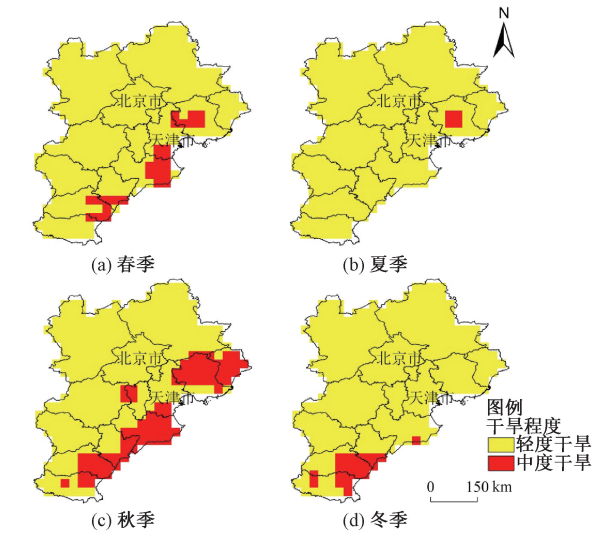


图 5 2017 年 4 月—2021 年 7 月京津冀地区地下水干旱程度的季节性空间分布图

Figure 5 Seasonal spatial distribution map of groundwater drought degree in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from April 2017 to July 2021

图 6 给出了 2014—2021 年京津冀地区地下水干旱程度的年际变化空间分布情况。从图 6 可以看出,研究区的地下水干旱情况自 2014 年逐渐加重,这一状况持续累积,到 2020 年时达到最为严重的程度,而在 2021 年则有所缓解。同时可以看出,研究区的东部一直是干旱状况较为严重的区域,2018 年和 2019 年中度干旱出现的区域位置上存在差异,前

者集中在秦皇岛市和唐山市,而后者集中在东南沿线城市,即沧州、衡水、邢台及邯郸 4 个城市。2020 年全区出现大面积中度以上的地下水干旱现象,其中东南沿线城市的干旱状况最为严重,达到重度以上的程度。2021 年京津冀地区的地下水干旱情况较上一年有所减轻,但研究区的中部、南部以及西北城市仍处于轻度地下水干旱状态。

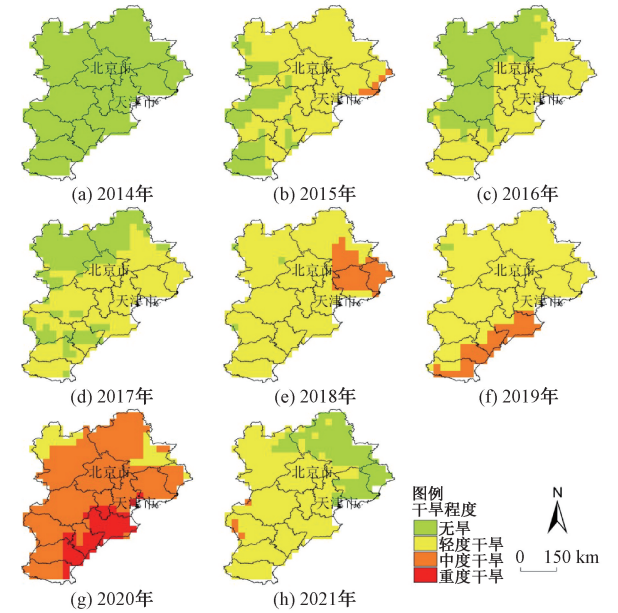


图 6 2014—2021 年京津冀地区地下水干旱程度的年际变化空间分布图

Figure 6 Spatial distribution map of interannual variation of groundwater drought degree in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2014 to 2021

3 讨论

为了便于比较 *GDI* 与降水、气温、*NDVI*、蒸散发以及南水北调调水等影响因素之间的关系,本文对各因素进行了与 *GRACE* 数据相同的距平处理,即将各年份数据减去 2004—2009 年的平均值,随后绘制了 *GDI* 与各影响因素的关系图,如图 7 所示。同时,对 3 者各月份的影像进行了均值处理,得到了年内变化的时序图,如图 8 所示。

从图 7 可知,与 *GDI* 曲线相比较,2004—2013 年,降水多为平年年份,气温、*NDVI* 和蒸散量波动较小,研究区总调水量较少,*GDI* 呈现持续降低趋势,这表明该时期地下水并未处于平衡状态。2012 年的强降水仅使 *GDI* 出现小幅上升,说明存在出水量远大于入水量的情况,这种状况多数由人类活动引起。2013—2015 年,除降水平年外还出现了降水枯年,尽管调水量有所增长,地下水供水量也在逐年减少,但极少的降水量无法有效补充地下水,地下水的

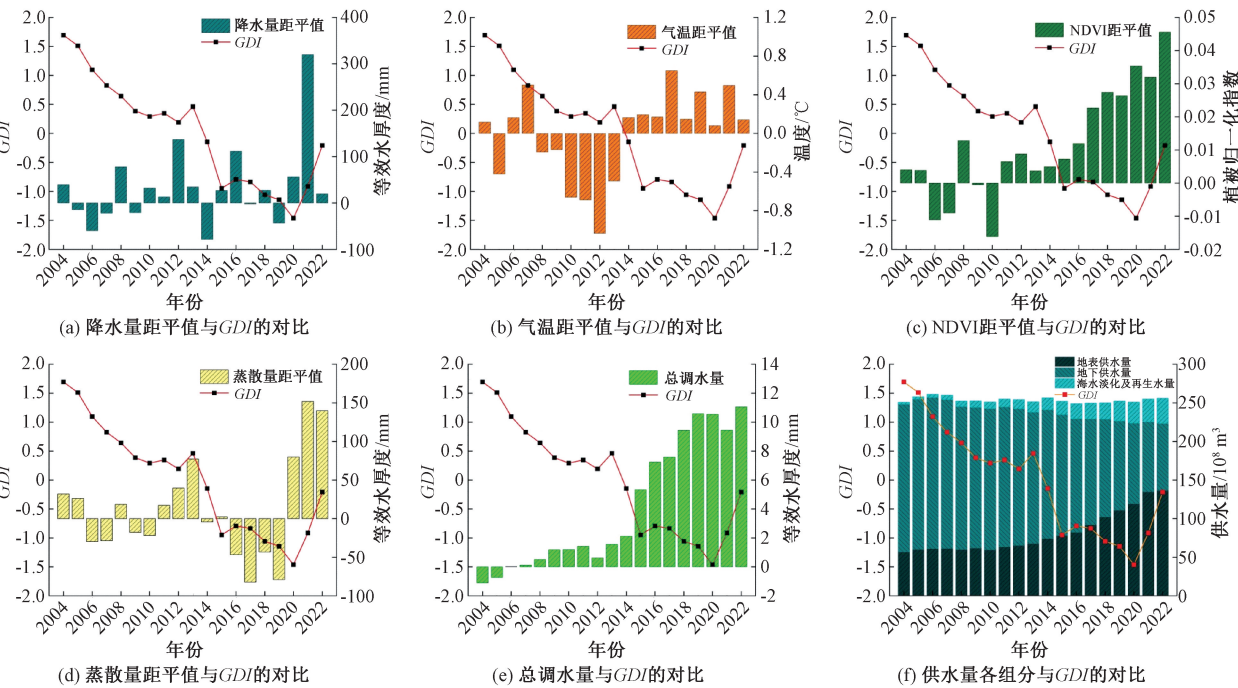


图 7 GDI 与多种影响因素的对比图

Figure 7 Comparison of GDI and various influencing factors

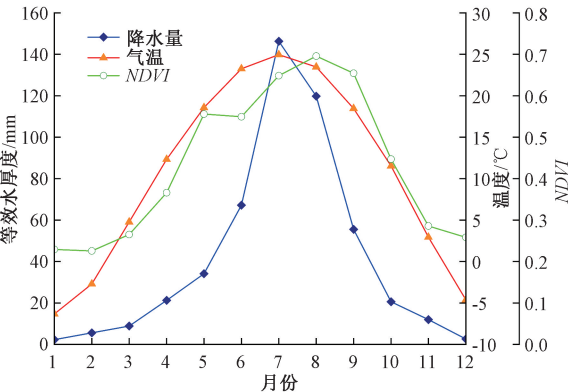


图 8 降水量、气温和 NDVI 月均值年内时序图

Figure 8 Annual time series of precipitation, temperature, and NDVI monthly average

损耗活动并未减轻,导致 GDI 大幅下降。2015—2020 年,得益于 2016 年的强降水、蒸散发量的持续低值、调水量的持续增多以及地下水供水量的锐减, GDI 先小幅上升后缓慢下降。2020—2022 年,2021 年虽然蒸散量持续高值,但充沛的降水、持续增多的调水量以及锐减的地下水供水量大幅缓解了研究区的地下水干旱状况, GDI 出现大幅上升趋势。

结合图 7(b)和图 8 可以观察到:研究区的气温呈现出缓慢上升的趋势,并在夏季(6—8 月)达到全年峰值, NDVI 值与气温趋势相似但存在两个峰值, 降水峰值集中在 7、8 月,且变化幅度更为陡峭。

分析可知,研究区南部的平原是以旱作为为主的农业区,种植模式主要为冬小麦-夏玉米一年两作,在气候上属于大陆性季风型暖温带半湿润气候,植

被变化是该地区蒸散趋势的主导因素<sup>[17]</sup>。作为中国重要的粮食产区,农业耕地的高复种率使得该地区 NDVI 常年保持在较高水平,但该地区降水量偏少,降水常年显著低于蒸散,差额主要来源于上游山区水库和地下水灌溉补充<sup>[18]</sup>。在春灌(3—5 月)和冬灌(10—11 月)期间,旱地灌溉的取水活动会加剧地下水资源的枯竭,同时,灌溉活动使得土壤水分增加,进一步强化了水分从土壤表面逃逸的蒸发作用。此外,夏季虽是高降水时期,但作物正值生长高峰(冬小麦的生长中、后期以及夏玉米的生长初期),会经历显著的变绿过程,高温和高 NDVI,使得蒸散作用明显,导致地下水储量难以得到充分补充<sup>[19-20]</sup>。

查阅中国水旱灾害防御公报<sup>[21-23]</sup>得知,2014 年全国 26 个省份(自治区、直辖市)发生干旱灾害,河北省作为冬小麦的主产区之一,2013 年入冬至 2014 年 4 月,降水较常年同期偏少 4~6 成,气温偏高,2014 年 6 月—8 月下旬,河北东部地区较常年偏少 5~7 成,夏伏旱达到峰值。2016 年,全国平均降水较常年偏多 16%,空间分布上呈现南北偏多、中部偏少的特点,7 月中下旬,海河流域自西南向东北出现强降雨,年降水量较常年偏多 1~3 成。2021 年,全国出现 42 次强降雨过程,海河流域大部分区域年降水量较常年偏多 3~7 成,京津冀 3 省市年平均降水量均为 1961 年有完整序列资料以来最多,且夏秋降雨偏多明显,秋雨持续时间长。

南水北调工程是缓解北方水资源短缺的重要战略工程。截至 2022 年 12 月,南水北调工程中线一期工程以及东线一期工程已经向京津冀地区累计调水 335.42 亿  $\text{m}^3$ 。从供水量角度来看,自工程正式运行以来,地表水在京津冀年供水总量中的占比增加了 16.84%,而地下水供水量的占比从原来的 76.46% 下降至 34.14%,地下水的开采量下降显著<sup>[24]</sup>;在用水量方面,考虑到 2014 年调水量较少,以 2015 年作为南水北调正式开通的节点,京津冀地区的年均生产用水(包括农业用水和工业用水)从节点之前的 207 亿  $\text{m}^3$  降至 158.83 亿  $\text{m}^3$ ,降幅超过 23.27%,而生活用水则从 40.8 亿  $\text{m}^3$  增至 52.08 亿  $\text{m}^3$ ,增长率为 28.34%,这一变化说明调水工程极大地改变了受水区的用水格局。在未来,用水和调水在地下水储量恢复方面的作用也将更加凸显。

综上所述,南水北调工程有效补充了京津冀地区的地表水储量,促进了供水和用水模式的转变,在缓解地下水的长期亏损中发挥了重要的作用。

## 4 结论

本研究采用 GRACE 重力卫星数据和 GLDAS 全球陆面同化系统数据,反演了京津冀地区 2003 年 10 月—2023 年 9 月地下水储量的变化,构建了 *GDI*,运用游程理论识别了研究区的地下水干旱事件,分析了地下水干旱的时空变化特征,探讨了地下水干旱变化的影响因素。得出以下结论:

(1)京津冀地区地下水干旱发生频率较高的区域集中在中部偏东的位置;轻度地下水干旱在穿过天津、北京和张家口三市的区域发生概率最高;中重度以及极端地下水干旱发生概率最高的区域分布在研究区的东南沿线上,且在空间上呈现出自东南向西北逐渐降低的分布趋势。

(2)从 2014—2021 年,研究区发生了 4 次干旱强度均处于轻度级别且干旱面积比例维持在 60% 以上的地下水干旱事件。从地下水干旱的季节性空间分布来看,东南沿线城市的秋季和春季干旱情况较为严重,夏季相对较轻,这一分布特征可能与该区域在 3—5 月和 10—11 月的农业灌溉活动有关。从地下水干旱的年际空间分布来看,地下水干旱情况自 2014 年降水量急剧减少后逐渐加重,累积持续到 2020 年,达到最为严重的程度,具体表现为全区出现大面积中度以上的地下水干旱现象,其中东南沿线城市的干旱状况最为严重,达到重度以上程度。2021 年,随着大幅降水,干旱情况有所缓解,但研究区的中部、南部以及西北城市仍处于轻度地下水干

旱状态。在整个研究时段内,研究区的中东部城市是轻度地下水干旱状况持续时间较长的区域。

(3)京津冀地区在过去 20 年中,降水主要呈现偏枯和平水年的交替状态,调水对地下水补给的贡献相对有限。尽管地下水开采量呈逐年下降趋势,但地下水储量的恢复并不显著。此外,研究区南部是重要的作物种植区,密集种植使得该区域的 *NDVI* 常年维持在较高水平。在作物生长周期内,大量灌溉用水主要依赖于地下水,这在很大程度上加剧了地下水资源的紧张。而在降雨量较多的夏季,高温和高 *NDVI* 值会导致高蒸散发量,使得地下水储量难以得到有效补充。

在京津冀地区这个人口密集、工业和农业集中发展的社会经济中心,降水量的常年不足和长期的地下水资源开采活动是该地区出现地下水干旱现象的主要原因。在未来的发展过程中,如何合理高效地开发利用水资源,实现水资源的“采-补”均衡,是仍需继续探讨的问题。

此外,由于 GRACE 数据的原始分辨率较低,在进行小尺度区域的空间特征分析时存在一定的局限性,未来的研究应致力于探索 GRACE 数据的降尺度方法,以提升数据的空间分辨率及精度。

## 参考文献:

- [1] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696–1718.
- [2] HUANG Z, PAN Y, GONG H, et al. Spatiotemporal patterns of groundwater storage changes in China from GRACE and GRACE-FO [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 255: 112245.
- [3] KARUNAKALAGE A, SARKAR T, KANNAUJIYA S, et al. The appraisal of groundwater storage dwindling effect, by applying high resolution downscaling GRACE data in and around Mehsana district, Gujarat, India [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, 13: 100559.
- [4] ZHOU T, WEN X H, FENG Q, et al. Bayesian model averaging ensemble approach for multi-time-ahead groundwater level prediction combining the GRACE, GLEAM, and GLDAS data in arid areas [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(1): 188.
- [5] 郑玮, 郑刚, 闫正龙, 等. 基于 GRACE 卫星的新疆平原区地下水储量变化研究 [J]. *时空信息学报*, 2025, 32(2): 193–202.

- ZHENG W, ZHENG G, YAN Z L, et al. Modelling spatiotemporal changes of groundwater reserves in Xinjiang plain area based on GRACE satellite[J]. *Journal of Spatio-Temporal Information*, 2025, 32(2): 193–202.
- [6] 兀泽坤, 李爱民. 南水北调东线工程运行前后山东省水储量变化分析[J]. *人民黄河*, 2024, 46(7): 72–78.
- WU Z K, LI A M. Analysis of changes of terrestrial water storage in Shandong Province before and after south-to-north water diversion project[J]. *Yellow River*, 2024, 46(7): 72–78.
- [7] 栗晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 34–42.
- SU X L, CHU J D, ZHANG T, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 34–42.
- [8] 黄润泽, 武蓉, 张三策, 等. 黄河流域中游地下水干旱演变规律及其对植被变化的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(5): 105–112.
- HUANG R Z, WU R, ZHANG S C, et al. Change in groundwater drought and its consequence for vegetation in the Middle Reaches of the Yellow River Basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(5): 105–112.
- [9] ZHOU Z G, LU B H, JIANG Z F, et al. Quantifying water storage changes and groundwater drought in the Huaihe River Basin of China based on GRACE data[J]. *Sustainability*, 2024, 16(19): 8437.
- [10] TOUATI F, BENARABA N, BENYAHIA S. Grace-based observations for near real-time assessment of groundwater drought severity index[C]//2024 IEEE Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS). Piscataway: IEEE, 2024: 396–400.
- [11] NIGATU Z M, YOU W, MELESSE A M. Drought dynamics in the Nile River Basin: meteorological, agricultural, and groundwater drought propagation[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(5): 919.
- [12] KARUNAKALAGE A, LEE J Y, DAQIQ M T, et al. Characterization of groundwater drought and understanding of climatic impact on groundwater resources in Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 634: 131014.
- [13] ZHONG Y L, FENG W, HUMPHREY V, et al. Human-induced and climate-driven contributions to water storage variations in the Haihe River Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 3050.
- [14] ZHU Q, ZHANG H. Groundwater drought characteristics and its influencing factors with corresponding quantitative contribution over the two largest catchments in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127759.
- [15] 苏万磊. 基于 Mann-Kendall 的秦皇岛市降水多时间尺度分析[J]. *水利科技与经济*, 2020, 26(11): 23–26.
- SU W L. Multi-time scale analysis of precipitation in Qinhuangdao city based on Mann-Kendall method[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2020, 26(11): 23–26.
- [16] 河北省水利厅. 2020 年河北省水资源公报[R]. 石家庄:河北省水利厅, 2021.
- Department of Water Resources of Hebei Province. *Water resources bulletin of Hebei Province 2020* [R]. Shijiazhuang: Department of Water Resources of Hebei Province, 2021.
- [17] 白鹏, 蔡常鑫. 1982—2019 年中国陆地蒸散发变化的归因分析[J]. *地理学报*, 2023, 78(11): 2750–2762.
- BAI P, CAI C X. Attribution analysis of changes in terrestrial evapotranspiration in China during 1982—2019[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(11): 2750–2762.
- [18] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应[J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 589–598.
- MO X G, LIU S X, LIN Z H, et al. Patterns of evapotranspiration and GPP and their responses to climate variations over the North China Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 589–598.
- [19] 李建明. 海河流域 250 米分辨率地表蒸散发遥感估算与应用研究[D]. 石家庄:河北师范大学, 2021.
- LI J M. Remote sensing estimation and application of surface evapotranspiration with 250 m resolution in Haihe River basin[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2021.
- [20] 赵钊. 华北平原作物需水量空间分布特征及影响机制研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2021.
- ZHAO Z. Study on the spatial distribution characteristics and influence mechanism of crop water requirement in North China Plain[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [21] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部编. 中国水旱灾害公报 2014[R]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.
- China's State Flood Control and Drought Relief Headquarters. Compiled by the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China water and drought disaster bulletin 2014* [R]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.
- [22] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 中国水利水电科学研究院, 水利部水情教育中心(中国水利报社). 山洪防御早知道 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2017.

Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters, China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, Water Resources Department Water Situation Education Center (China Water Resources News). Early knowledge of mountain torrent disaster defense [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2017.

[23] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 中国水利水电科学研究院, 水利部水情教育中心(中国水利报社). 山洪防御早知道[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.

Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters, China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, Water Resources Department Water Situation Education Center (China Water Resources News). Early knowledge of mountain torrent disaster defense [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2022.

[24] 韩云环, 马柱国, 李明星. 近 20 年京津冀陆地水储量变化特征及其影响因子分析[J]. 气候与环境研究, 2024, 29(5): 519-533.

HAN Y H, MA Z G, LI M X. Change characteristics and influencing factors of terrestrial water storage in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in the past 20 years[J]. Climatic and Environmental Research, 2024, 29(5): 519-533.

Spatio-temporal Variation Characteristics of Groundwater Drought in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on GRACE Data

LI Aimin<sup>1</sup>, GUO Zhenqiang<sup>1</sup>, WU Zekun<sup>2</sup>, CHENG Ziyi<sup>1</sup>

(1. School of Geo-science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. TianDi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

**Abstract:** This study investigated the spatio-temporal characteristics and influencing mechanisms of groundwater drought in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, aiming to provide scientific support for sustainable water resource management and promote high-quality regional development. Using Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite data (October 2003 to September 2023) and Global Land Data Assimilation System (GLDAS) data, groundwater storage anomalies (GWSA) were retrieved for the study area. Based on these results, a groundwater drought index (*GDI*) was constructed, through which groundwater drought events were identified using run theory. The occurrence frequency and spatio-temporal patterns of groundwater drought were subsequently analyzed, followed by an examination of relationships between groundwater drought and various influencing factors using meteorological data and water resource bulletins. The results indicated that: ① Higher frequencies of groundwater drought occurred in the central-eastern region, with the highest frequencies of moderate-to-severe drought concentrated along the southeastern periphery; ② Groundwater drought events primarily clustered between 2014 and 2021, characterized by high frequency, wide spatial extent, but relatively low intensity; ③ Seasonally, autumn and spring droughts were most severe in southeastern cities, while summer droughts were milder, correlating with agricultural irrigation activities during March to May and October to November; ④ Interannually, groundwater drought intensified after 2014 following sharp precipitation declines, reaching maximum severity in 2020 when widespread moderate-to-severe drought covered the entire region, before alleviating in 2021 due to increased precipitation; ⑤ The South-to-North Water Diversion Project effectively replenished surface water resources and facilitated shifts in water supply-demand patterns, playing a crucial role in mitigating long-term groundwater deficits.

**Keywords:** GRACE gravity satellite; Beijing-Tianjin-Hebei Region; groundwater drought; groundwater storage anomalies; run theory