·水文与水资源工程·

文章编号: 1672 - 3317 (2024) 05 - 0105 - 08

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

黄润泽,武 蓉,张三策,兰鹏飞,姚 宁* (西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:【目的】明确黄河流域中游地下水干旱时空演变规律。【方法】基于 GRACE/GRACE-FO 卫星数据和 GLDAS 数据计算标准化地下水干旱指数 SGDI,利用改进的 Mann-Kendall 趋势检验研究和识别黄河流域中游的地下水干旱 时空演变规律,利用 Spearman 相关分析研究地下水干旱对植被变化的响应。【结果】①黄河流域中游地下水储量异 常以-0.027 mm/d 的速率变化,时空分布极不均匀。②地下水干旱时间上分布不均匀,在 2018 年之后发生中度甚至 重度的地下水干旱,且 SGDI 的 Theil-Sen 变化率为- $4.10 \times 10^4 / d$,未来地下水干旱有显著的增加趋势。③地下水干旱 空间上分布不均匀,干旱增加趋势面积占比为 63.02%,未来干旱恶化趋势增加,出现自西南向东北加剧现象。④植 被变化对地下水干旱的驱动作用不显著。【结论】黄河流域中游地下水干旱较严重,地下水干旱对植被变化存在不显 著的响应。

关键词: GRACE; 地下水干旱指数; 时空变化; 成因分析; 黄河流域中游 中图分类号: P333 文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023261

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 Runze, WU Rong, ZHANG Sance, 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.

0 引言

【研究意义】地下水是我国重要的战略资源,是 维持水土生态稳定尤为关键的系统组成。当缺乏足够 的水补给或过度消耗水储备会导致地下水减少,即发 生地下水干旱,其具备诱发地面沉降和海水入侵等危 害的潜在能力[1-2]。近年来,黄河流域中游对地下水 的需求量不断增加,地下水系统能否保障流域生态健 康用水需求存在很大的不确定性,有必要对黄河流域 中游地下水干旱进行评估,尽可能避免因地下水枯竭 而导致地面塌陷、泥石流等水土流失次生灾害。因此, 深入研究地下水干旱时空演变规律,寻找导致地下水 干旱发生的潜在因素,可为政府抗旱防灾提供参考依 据,对确保当地生态可持续发展和促进经济高质量发 展具有重要意义。

【研究进展】当前,监测地下水干旱的研究较多,

收稿日期: 2023-06-13 修回日期: 2024-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209070); 大学生创新创业训练 项目(S202110712544)

作者简介:黄润泽(2001-),男,广东江门人。学士,主要从事干旱时空 演变规律研究。E-mail: huangrunzezero@nwafu.edu.cn

通信作者:姚宁(1988-),男,甘肃张掖人。副教授,博士,主要从事干 早时空演变规律研究。E-mail: yaoning@nwafu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Noori 等[3]利用监测井获取地下水水文信息,计算地 下水位指数,从而评估阿富汗喀布尔地区的地下水波 动情况。Brakkee 等[4]通过数值模拟构建地下水位指 数以评价荷兰地区的干旱程度。Roshni等[5]基于统计 概率分布的 Copula 函数建立地下水干旱风险指数和 环境危害指数,进而研究印度东南部的地下水干旱问 题。目前,重力恢复及气候实验(GRACE)重力卫 星已经成为国内外研究大尺度地下水干旱的有效途 径以及研究生态系统问题的重要手段^[6-9]。Xu 等^[10] 结合集成经验模态分解(EEMD)方法分解 GRACE 卫星数据,研究华北平原不同时间尺度的地下水干 旱特征和地下水干旱对季节性降水的动态响应过程。 粟晓玲等[11]利用 GRACE 卫星数据建立地下水干旱 指数,识别西北地区的地下水干旱并研究地下水干旱 对气象干旱的响应关系。Zhang 等[12]通过 GRACE 获 得地下水干旱指数,结合标准化降水指数和标准化土 壤水分指数,揭示长江流域和黄河流域气象干旱、农 业干旱和地下水干旱三者之间的传播规律。

研究地下水干旱成因有助于认识干旱传播规律 和降低旱灾风险[13]。杨钰泉等[14]研究温度、植被等自 然因素和人口、经济总量等社会因素对黄河流域中游

地下水储量异常的影响。Zhu 等^[2]探究不同干旱类型、土地利用、地下水人工抽取等多驱动因子对长江流域和黄河流域地下水干旱的影响。然而,受退耕还林还草政策的影响,黄河流域中游下垫面尤其是植被条件逐年变化,可能会作用于干旱传播^[13]。因此,从植被变化的角度研究黄河流域中游地下水干旱的驱动因素和成因机制,对有效管控地下水干旱风险具有重要意义。

【切入点】目前,针对黄河流域中游的干旱研究多集中于气象干旱、径流干旱和农业干旱,关于地下水干旱及其对植被变化的响应的研究较少。【拟研究的关键问题】为此,基于黄河流域中游2002年4月一2021年12月的GRACE/GRACE-FO数据和GLDAS数据得到地下水储量异常并估算标准化地下水干旱指数,利用游程理论、改进的Mann-Kendall趋势检验、Spearman相关分析等方法,阐明该区域地下水干旱的时空变化特征;利用NDVI揭示植被对地下水干旱的影响,探究干旱驱动因素,为黄河流域中游地区水资源管理和抗旱防灾工作提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域中游位于内蒙古自治区托克托县河口镇至河南郑州荥阳市的桃花峪花园口(32~42°N,104~113°E),流域面积为34.4万km²,干流长度约为1206km(图1)。中游河段跨越暖温带和中温带,属于温带季风气候和温带大陆性气候,大部分地区夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,受黄河气旋的影响,平均年降水量约为520mm。流域内多数支流处于黄土高原地区,夏季降雨集中作用于黄土表面,水土流失严重,是黄河下游泥沙的主要来源区。

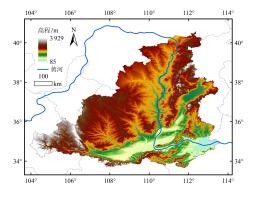


图 1 黄河流域中游高程

Fig.1 Elevation distribution in the Middle Reaches of the Yellow River Basin

1.2 数据介绍

1.2.1 GRACE/GRACE-FO

GRACE 重力卫星是美国国家航空航天局

(NASA) 和德国航空航天中心 (DLR) 联合发射的 观测全球时变重力场信号的双星系统, 可由地球重力 场变化反演得到陆地水储量(TWS)相对于基准(2004 —2009 年)的陆地水储量异常(TWSA),而 GRACE 卫星因运行寿命问题于 2017 年 10 月任务终止, GRACE-FO 卫星于 2018 年 5 月接替了 GRACE 卫星 对地球重力场的观测任务。德克萨斯大学奥斯汀分校 空间研究中心(CSR)、德国亥姆霍兹波茨坦中心 (GFZ)、美国宇航局喷气推进实验室 (JPL) 共三家 机构利用 GRACE Level-1 数据得到地球重力场模型 GRACE Mascon 数据。本研究以黄河流域中游为研究 区域,提取 CSR 发布的 GRACE RL06 Mascon 卫星产 品提供的逐月陆地水储量异常数据(https:// www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html), 数据 时间为 2002 年 4 月-2021 年 12 月, 空间分辨率为 0.25 % 0.25 °。 GRACE 卫星和 GRACE-FO 卫星时期分 别缺失20个月和2个月数据,本研究均采用线性内插 法进行插补。GRACE与GRACE-FO卫星存在11个月 的空白期(2017年7月—2018年5月),本研究采用 贝叶斯卷积神经网络(BCNN, Bayesian Convolutional Neural Network)深度学习方法插补空白期的水储量异 常数据(https://zenodo.org/record/5336992)。

陆地水储量异常(TWSA)包括地表水储量异常(SWSA)和地下水储量异常(GWSA),地表水储量异常进一步可细分为土壤水储量异常(SMSA)、雪深当量异常(SWEA)、植物冠层水储量异常(CWSA)、降雨地表径流量及雪融径流量异常(QsA)和生物水储量异常等,其中因生物水储量较难量化,同时鉴于半湿润半干旱地区内生物水储量异常微小,故其异常量忽略不计。陆地水储量异常计算式为:

TWSA(t) = GWSA(t) + SMSA(t) + SWEA(t) + CWSA(t) + QsA(t),

(1)

式中: TWSA(t)、GWSA(t)、SMSA(t)、SWEA(t)、CWSA(t)和 QsA(t)分别为陆地水储量异常(mm)、地下水储量异常(mm)、土壤水储量异常(mm)、雪深当量异常(mm)、植物冠层水储量异常(mm)和地表径流异常(mm),其中地表径流异常包括降雨地表径流量异常(mm)、壤中流径流异常(mm)及雪融径流量异常(mm),土壤水储量异常、雪深当量异常、植物冠层水储量异常、降雨地表径流量异常、壤中流径流异常和雪融径流量异常由全球陆地资料同化系统(GLDAS)数据集提供。

1.2.2 GLDAS

GLDAS 是由美国国家航空航天局戈达德航天飞行中心(GSFC)和美国国家海洋与大气管理局国家环境预报中心(NCEP)建立的全球陆地资料同化系

统。GLDAS 发布的地表水储量相关模型包括 Noah、CLM、Mosaic、VIC 共 4 个产品,本研究采用 GLDAS Noah 陆地表面模型提供的逐月地表水储量(SWS)数据(https://search.earthdata.nasa.gov/),以黄河流域中游为研究区域,包括土壤水储量(SMS)(土层深度分别为 $0\sim10$ 、 $10\sim40$ 、 $40\sim100$ 、 $100\sim200$ cm)、雪水当量(SWE)、植物冠层水储量(CWS)、地表径流异常(QS),数据时间为 2002 年 4 月—2021 年 12 月,空间分辨率为 0.25 ~0.25 \sim

为与 GRACE 数据保持一致,GLDAS 减去基准 (2004—2009 年) 得到 GLDAS 距平数据,即地表水储量异常。

$$\Phi A(t) = \Phi(t) - \overline{\Phi}_{2004-2009},$$
 (2)

式中: Φ 代表SMS/SWE/CWS/Qs, $\Phi(t)$ 、 $\Phi A(t)$ 为相应的水储量以及水储量异常序列, $\overline{\Phi}_{2004-2009}$ 为相应的时间基准。

在不考虑生物水储量异常的条件下,地下水储量 异常计算式为:

GWSA(t)=TWSA(t)-SMSA(t)-SWEA(t)-CWSA(t)-QsA(t),(3)

1.2.3 其他数据

归一化植被指数 (*NDVI*) 可以反映植被覆盖度,目前广泛应用于生态环境的定量研究中。国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/) 提供了 2001—2022 年由 MODIS 卫星识别合成的中国空间分辨率为 1 km×1 km 逐月 *NDVI* 数据,为确保 *NDVI* 与GRACE、GLDAS 卫星数据在空间分辨率上一致,本研究采用最近邻插值法对 *NDVI* 数据重采样,得到2002年4月—2021年12月空间分辨率为 0.25°×0.25°的 *NDVI* 数据。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化地下水干旱指数

基于 GRACE/GRACE-FO 和 GLDAS 数据,得到地下水储量异常(GWSA),计算序列内不同年份间同一月份的均值 μ ,然后从 GWSA 时间序列中扣除当月均值并除以当月标准差 σ ,得到标准化地下水干旱指数(SGDI),计算式为:

$$SGDI_{i,j} = \frac{GWSA_{i,j} - \mu_j}{\sigma_i}, \tag{4}$$

式中: i、i分别表示年份、月份。

在外界相同条件下,地下水干旱较气象干旱、水文干旱和农业干旱对外界要素的反应更为缓慢^[15]。本研究认为当 *SGDI*<-0.5 时发生地下水干旱,根据干旱严重程度划分为 4 种干旱类型 (表 1)。由于缺乏实测地下水位数据,本研究结合《水旱灾害公报》和《地

下水动态月报》,对基于 GRACE/GRACE-FO 和 GLDAS 结合得到的地下水储量异常的主要特征进行 验证。

表 1 SGDI干旱等级划分标准

Tab.1 Drought classification based on standardized groundwater drought index (SGDI)

干旱类型	正常	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极端干旱
SGDI	-0.5~0.5	-1.0~-0.5	-1.5~-1.0	-2.0~-1.5	<-2.0
1.3.2 游程理论					

本研究利用游程理论来识别地下水干旱事件、干旱历时和干旱强度。游程被定义为时间序列的一部分,其中所有值均低于或高于所选择某个阈值,本次取-0.5。当 *SGDI*<-0.5 时,认为该月份为干旱事件的开始,直到 *SGDI*>0 时认为该干旱事件结束。干旱历时是指干旱事件的持续时间,干旱程度是指干旱事件从干旱开始到结束的整个区域的绝对值,将干旱程度除以干旱历时得到干旱强度。

1.3.3 趋势及突变分析

本研究中采用改进的无参数 Mann-Kendall (MMK, Modified Mann-Kendall) 趋势检验方法对 *SGDI* 趋势进行检验,MMK 趋势检验用修正的 Mann-Kendall 统计量合理地限制序列自相关的影响^[16]。采用 Mann-Kendall 突变检验方法来检测研究序列的 突变年份^[17]。即:

$$Var^*(S) = \frac{nVar(S)}{n^*} = n^s n(n-1)(2n+5)/18,$$
 (5)
式中: n^* 为有效样本长度, n^s 为序列自相关修正系数。 n^s 计算式为:

$$n^{s} = \begin{cases} 1 + \frac{2}{n} \sum_{j=1}^{n-1} (n-1)\rho_{j} & , & j > 1\\ 1 + 2 \frac{\rho_{1}^{n+1} - n\rho_{1}^{2} + (n-1)\rho_{1}}{n(\rho_{1}-1)^{2}} & , & j = 1 \end{cases}$$
 (6)

式中: ρ_i 为j阶滞后距对应的序列自相关系数。

Theil-Sen 斜率法是一种非参数统计方法,是对单调趋势幅度的稳定估计,它反映了原始序列中包含的所有子序列的斜率集中值随时间变化规律,本研究用于估计 SGDI 即地下水干旱在空间上的变化趋势。与普通最小二乘回归相比,该方法不要求原始序列服从特定的分布。其计算式为:

$$R_s = \text{Median} \left\{ k \in \mathbb{R} \middle| k = \frac{x_j - x_i}{j - i} \right\}$$
, $1 \le i \le j \le T$, (7)

式中: R_s 是 Theil-Sen 斜率估计值, x 是时间序列, i、j 为对应的时间节点, T 为时间序列长度。 R_s 反映了时间序列趋势的倾斜程度, R_s >0 表示该样本有上升趋势, R_s <0 表示该样本有下降趋势。

1.3.4 地下水干旱成因分析方法

Spearman 相关系数是一种衡量 2 个变量之间的相

关性的非参数统计方法,具有非参数性和鲁棒性较好的优点,适用于非线性时间序列之间的分析比较。即:

$$\rho = 1 - (6\sum d^2) / (n(n^2 - 1)), \tag{8}$$

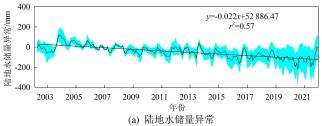
式中: Σd^2 表示 2 个变量等级之间差值的平方和,n 表示样本个数。

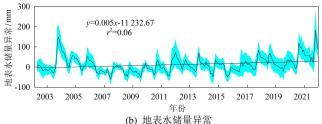
为避免数据趋势性和季节性对相关分析的影响,本研究首先对月 GWSA 取年均值得到年 GWSA,并采用线性去趋势方法以实现地下水储量异常的去趋势化。其次,利用最大值合成法得到年 NDVI,同样采用线性去趋势方法进行处理。最后,对年 GWSA 和年 NDVI 进行 Spearman 相关分析。由于 2002 年地下水储量异常数据不足 12 个月,本文取 2003 年 1 月—2021 年 12 月数据进行相关研究。

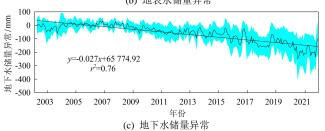
2 结果与分析

2.1 地下水储量异常的变化特征

2015年6—11月黄河流域中游地下水储量异常出现连续明显的下降,《地下水动态月报》中实测山西临汾盆地和太原盆地的地下水位下降,而关中平原平均地下水位较稳定,同样在2021年10—12月,地下水储量异常出现连续明显的上升,山西临汾盆地和太原盆地的地下水位上升,而关中平原平均地下水位波动较小,说明本研究地下水储量异常和实际地下水位变化在丰枯变化特征上存在一定的同步性(图2)。总体上看,地下水储量异常在2018年后出现明显的波动下降,《水旱灾害公报》反映陕西省和山西省在2018年后总作物受灾面积逐年增加,二者趋势较为一致。







注 蓝色范围代表空间偏差。 图 2 水储量异常时间分布

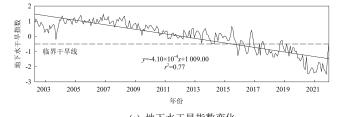
Fig.2 Time distribution of water storage anomaly

陆地水储量异常的变化幅度介于-219.44~121.60 mm, 2003年10月最大, 2020年7月最小, 陆地水 储量异常随时间呈下降趋势, 其线性变化率为-0.022 mm/d。2010 年后每月陆地水储量异常的空间偏差范 围较 2010 年前大,说明后期陆地水储量异常空间上 差异明显,分布极不均匀。地表水储量异常的变化幅 度介于-60.03~181.59 mm, 2021年10月最大, 2007 年6月最小,地表水储量异常随时间呈上升趋势,其 线性变化率为 0.005 mm/d, 且空间上差异较小。陆地 水包括地表水和地下水,与地表水储量异常相比,陆 地水储量异常涵盖了一部分地下水储量异常, 因此其 变化幅度更大, 受观测技术、人类活动等方面影响也 可能导致不确定性波动幅度差异。地下水储量异常的 变化幅度介于-249.58~34.40 mm, 2006年11月最大, 2020年7月最小,地下水储量异常随时间呈下降趋 势, 其线性变化率达到-0.027 mm/d, 每月地下水储量 异常的空间偏差规律同陆地水储量异常较为相似, 2010年后地下水储量异常的空间差异较明显。

2.2 地下水干旱时空演变规律

2003-2021 年, SGDI 总体上呈下降趋势 (-4.10×10⁻⁴/d), 2021 年 10 月最小为-2.50, 属于极 端干旱(图3)。其中,出现干旱的月份共计65月次, 其中轻度干旱 21 月次,中度干旱 24 月次,重度干旱 6 月次, 极端干旱 14 月次。干旱发生大多数集中于 2016—2021年。2015年10—12月发生历时3个月的 地下水干旱,而 2016年4月—2021年11月多次发生 持续时间久、干旱烈度大、影响范围广的地下水干旱。 根据游程理论,2016年4-8月发生历时5个月干旱 强度为-0.844 的轻度干旱; 2016年12月一次年3月 发生历时 4 个月干旱强度为-1.038 的中度干旱; 2017 年 5-6 月发生历时 2 个月干旱强度为-0.882 的轻度 干旱; 2017年8月—2018年8月发生13个月干旱强 度为-1.090 的长历时中度干旱; 2018年11月—2021 年 11 月发生 37 个月干旱强度为-1.602 的超长历时重 度干旱,期间发生6月次重度干旱和14月次极端干 早。总体上,2016年4月-2021年11月发生的多次 干旱事件被认为是不连续的干旱集群, 表明近年来黄 河流域中游频繁出现地下水干旱,尤其在 2018 年之 后发生重度甚至极端干旱。突变检验表明,统计量 UFK 和 UBK 的变化曲线交点不位于检验范围之内, 没有通过 α =0.05 的显著性检验,说明时间上 SGDI 没有发生的突变, 而 2011—2021 年 UFK 通过 α =0.05 的显著性检验,且表现出持续的下降特征,说明 2011 年后 SGDI 随时间有显著的下降趋势。黄河流域中游 SGDI 的 Theil-Sen 斜率为-4.10×10⁻⁴/d,MMK 趋势通 过 α =0.05 的显著性检验, SGDI 的下降趋势亦表明区

域发生地下水干旱的趋势增加。



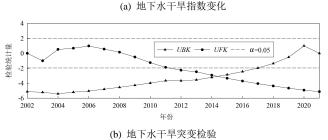


图 3 地下水干旱指数变化及突变检验

Fig.3 Changes and mutation test of groundwater drought index

2021年10月的 SGDI 最小,出现极端地下水干旱,干旱面积占比高达95.81%,基本涵盖整个黄河流域中游,而极端干旱面积占比达到64.66%,集中于黄河流域中游的中部,南北走向均出现极端干旱情况,其中西安以北、庆阳以东、延安以南等人口密集区以及太原以南、榆林以北和朔州以西等矿产资源开采区的干旱情况更为严峻,说明2021年10月的区域干旱情况极为严重(图4)。

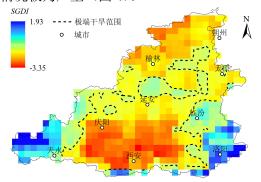


图 4 2021年10月地下水干旱指数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of groundwater drought index in October 2021

2002 年 4 月一2021 年 12 月黄河流域中游 SGDI 的 Theil-Sen 斜率为-0.014~0.007/月(图 5)。流域中游的地下水干旱趋势空间分布不均匀,出现从西南部、南部向东部、东北部和北部干旱趋势逐渐加剧的现象。天水西北部、关中平原少部分地区 Theil-Sen 斜率为正,即有地下水干旱减少的趋势,而天水中部和东北部、庆阳西部和北部、关中平原大部包括西安、洛阳西南部和西部 Theil-Sen 斜率为负但均未通过 MMK的显著性检验,说明这些区域的地下水干旱没有明显的趋势,保持一定的地下水稳定性,这可能由于当地灌溉和地形因素有关。在通过 MMK 显著性检验的条件下,庆阳中部和南部、延安大部、黄河中游的北部

(包括榆林全域、朔州西部)和黄河中游的东部(包括太原和临汾全域、洛阳北部)的负 Theil-Sen 斜率说明当地有显著的地下水干旱增加趋势,面积占黄河流域中游的 63.02%。

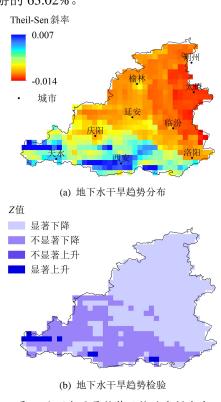


图 5 地下水干旱趋势及检验空间分布

Fig.5 Spatial distribution of groundwater drought trend and test 2.3 地下水干旱对植被变化的响应

黄河流域中游的逐月 *NDVI* 整体上缓慢上升,黄河流域中游的植被覆盖面积缓慢增加(图 6)。2009年之后黄河流域中游每年年内月 *NDVI* 最大值都超过了 0.6,说明达到较高的植被覆盖水平,这与政府长期坚持生态文明理念尤其是采取持续的沙漠治理、努力恢复黄土高原生态的各项环境举措有关^[18]。

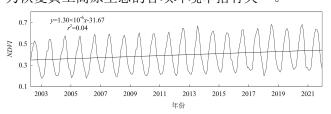


图 6 归一化植被指数 NDVI 变化

Fig.6 Changes in normalized difference vegetation index

2003 年 1 月—2021 年 12 月年 *GWSA* 和年 *NDVI* 之间的相关系数空间分布不均匀(图 7),最大为 0.75,最小为-0.69。黄河流域中游大部分地区的结果没有通过 α=0.05 的假设检验,说明这部分地区的地下水变化和地表植被覆盖之间没有明显的相关性。黄河流域中游西南部天水周边部分地区、北部延安至榆林和东部临汾、太原等地年 *GWSA* 和年 *NDVI* 相关性通过显著性检验,天水周边地区相关系数为负,其余地区系

数为正,说明西南部天水周边地区的地下水储量异常和地表植被覆盖之间具有中等程度的负相关,北部榆林以北地区和东部临汾、太原等地的地下水储量异常与地表植被覆盖表现为中等程度的正相关。然而,尽管年 GWSA 和年 NDVI 的相关性较高,但是大部分格点均不显著,目前的样本数据无法证明 NDVI 对地下水干旱存在明显的影响作用。

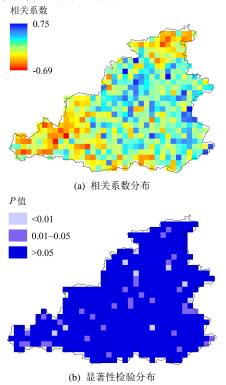


图 7 植被与地下水储量异常相关分析及检验空间分布 Fig.7 Spatial distribution of correlation and test between vegetation and groundwater storage anomaly

3 讨论

黄河流域大部分地区地处干旱与半干旱气候区, 水资源供需矛盾比较突出,生态环境脆弱,严重制约 了经济社会发展。1999 年开始实施的大规模退耕还 林(草)生态建设工程,对黄河流域植被格局和生态 水文过程产生了重大影响。本研究发现, 黄河流域中 游的陆地水储量异常和地下水储量异常均存在不同 程度的下降趋势,这与任立良等[19]、杨钰泉等[14]和王 希栋等^[20]研究结果一致。2015 年后,黄河流域中游 发生严重的地下水干旱事件。从空间上来看,黄河流 域中游大部分地区具有显著较大的干旱趋势,这与 Zhu 等^[2]的研究结果在干旱趋势变化幅度上不一致, 主要原因在于研究的时间长度不同, 本研究发现, 2020 年后黄河流域中游出现干旱程度更严重、持续 时间更长的地下水干旱事件,该情况在一定程度上影 响了趋势分析, 也表明近年来黄河流域中游面对地下 水干旱的严峻形势。

植被对地下水干旱的驱动作用不显著[14]。然而, 王希栋等[20]基于去季节性年相关分析认为,地下水储 量异常与植被存在强负相关关系, 植被覆盖增加会引 起蒸散发增加进而导致地下水储量补给减少。虽然黄 河流域中游的植被覆盖扩大对增加区域蒸散发有促 进作用[21-22],但是植被增加也影响了区域的降水量和 水土保持能力[22-28],可能导致植被对地下水的响应不 同。在植被恢复影响下黄土高原地区产流模式渐趋蓄 满产流[24,26-27],降水和入渗的增加有助于补给地下水, 在一定程度上减弱了蒸散发对地下水补给的负作用, 使得植被作用对地下水储量异常影响较小, 地下水干 旱对植被变化不敏感[24-27]。因此,本研究基于去趋势 性和去季节性的地下水储量异常和归一化植被指数 进行年相关分析,通过减少时间序列趋势性对相关分 析的影响, 更真实地反映植被与地下水干旱之间的关 系,结果更为合理。此外,本研究仅考虑了植被与地 下水干旱的关系,对于土地利用变化、土壤组成等对 地下水干旱的作用尚未研究,有待后续作进一步的分 析和探讨。

4 结 论

- 1) 黄河流域中游水储量异常时空分布不均匀。时间上,陆地水储量异常、地表水储量异常和地下水储量异常分别以-0.022、0.005、-0.027 mm/d 的速率变化;空间上,陆地水储量异常和地下水储量异常分布极不均匀,而地表水储量异常分布较为均匀。
- 2)2014年后黄河流域中游的地下水干旱发生共计65次,其中重度干旱6月次,极端干旱14月次。2016—2021年黄河流域中游多次发生连续的地下水干旱事件,且干旱程度不断增加。黄河流域中游地下水干旱随时间有显著增加趋势。
- 3) 2021 年 10 月黄河流域中游几乎全域出现地下水干旱,极端干旱面积占比达 64.66%。黄河流域中游北部、东部广大地区的地下水干旱趋势显著增加,出现自西南向东北加剧的现象。
- 4)未来黄河流域中游存在植被增多的趋势,而 目前植被对地下水干旱的驱动作用不显著。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] YIN J N, MEDELL Ń-AZUARA J, ESCRIVA-BOU A. Groundwater levels hierarchical clustering and regional groundwater drought assessment in heavily drafted aquifers[J]. Hydrology Research, 2022, 53(7): 1 031-1 046.
- [2] ZHU Qian, ZHANG Hao. Groundwater drought characteristics and its influencing factors with corresponding quantitative contribution over the two largest catchments in China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609:

127 759.

- [3] NOORI A R, SINGH S K. Spatial and temporal trend analysis of groundwater levels and regional groundwater drought assessment of Kabul, Afghanistan[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(20): 698.
- [4] BRAKKEE E, VAN HUIJGEVOORT M H J, BARTHOLOMEUS R P. Improved understanding of regional groundwater drought development through time series modelling: The 2018–2019 drought in the Netherlands[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(3): 551-569.
- [5] ROSHNI T, CHOUDHARY S, JHA M K, et al. Management of groundwater drought risk by reliability theory and copula model in Sina Basin, India[J]. Sustainable Water Resources Management, 2022, 8(1): 23.
- [6] DENG Shanshan, LIU Suxia, MO Xingguo. Assessment and attribution of China's droughts using an integrated drought index derived from GRACE and GRACE-FO data[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127 170.
- [7] WANG Fei, LAI Hexin, LI Yanbin, et al. Identifying the status of groundwater drought from a GRACE mascon model perspective across China during 2003–2018[J]. Agricultural Water Management, 2022, 260: 107 251.
- [8] WANG Fei, WANG Zongmin, YANG Haibo, et al. Utilizing GRACE-based groundwater drought index for drought characterization and teleconnection factors analysis in the North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124 849.
- [9] 谢小伟. 黄河中上游地区水储量变化及陆地水负荷形变研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019. XIE Xiaowei. Research on water storage change and hydrological loading deformation in the middle and upper reaches of the Yellow
- River[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
 [10] XU Yi, GONG Huili, CHEN Beibei, et al. Long-term and seasonal
- variation in groundwater storage in the North China Plain based on GRACE[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 104: 102 560.

 [11] 粟晓玲,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 Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, 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.
- [12] ZHANG Hao, DING Jie, WANG Yushi, et al. Investigation about the correlation and propagation among meteorological, agricultural and groundwater droughts over humid and arid/semi-arid basins in China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127 007.
- [13] 智协飞,田云涛,陈昌春,等.干旱传播研究进展与展望Ⅱ:影响因素与干旱传播研究展望[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(4):654-668.
 - ZHI Xiefei, TIAN Yuntao, CHEN Changchun, et al. Progress and prospects in drought propagation research part II: Influencing factors and research prospects[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 654-668.
- [14] 杨钰泉,张钰,史伟明,等.基于 GRACE 卫星的黄河流域地下水储量时空变化[J]. 甘肃科技,2021,37(10):23-26,3.
- [15] HAN Zhiming, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. GRACE-based high-resolution propagation threshold from meteorological to groundwater drought[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108 476.
- [16] HAMED K H, RAMACHANDRA RAO A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1): 182-196.
- [17] LI Y, YAO N, CHAU H W. Influences of removing linear and nonlinear trends from climatic variables on temporal variations of annual

- reference crop evapotranspiration in Xinjiang, China[J]. The Science of the Total Environment, 2017, 592: 680-692.
- [18] 马耘秀, 夏露, 范毅, 等. 不同土地利用和地形条件对黄土丘陵区土壤水分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 77-84.
 - MA Yunxiu, XIA Lu, FAN Yi, et al. The combined effects of land usage and topography on soil moisture change in a loess area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 77-84.
- [19] 任立良, 王宇, 江善虎, 等. 基于 GRACE和 GRACE-FO 的黄河流域 陆地水储量及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 26-32.

 REN Liliang, WANG Yu, JIANG Shanhu, et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Resign II. Water Resources Protection, 2022.
- analysis of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 26-32.

 [20] 王希栋,孙文义,穆兴民,等. 黄河流域地下水储量变化特征及其驱
- 动因素[J]. 人民黄河, 2023, 45(8): 96-100.

 WANG Xidong, SUN Wenyi, MU Xingmin, et al. Variation characteristics and driving factors of groundwater storage in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023, 45(8): 96-100.
- [21] 邵蕊. 黄土高原大规模植被恢复的区域蒸散耗水规律及其生态水文效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
 - SHAO Rui. Effects of large-scale vegetation restoration on evaporative water consumption and eco-hydrological process over the Loess Plateau, China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [22] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 594-606.
 - ZHANG Baoqing, SHAO Rui, ZHAO Xining, et al. Effects of large-scale vegetation restoration on eco-hydrological processes over the Loess Plateau, China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 594-606.
- [23] 王坤, 陈林, 庞丹波, 等. 宁夏中部干旱区降水量及可利用降水量多时间尺度变化特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 106-116. WANG Kun, CHEN Lin, PANG Danbo, et al. Variation in precipitation and net precipitation in arid area in central Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10): 106-116.
- [24] 刘卓昕. 植被恢复对黄土丘陵沟壑区土壤水文性质以及产流模式的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.

 LIU Zhuoxin. Study on the effect of vegetation restoration on soil hydrological properties and flow production patterns in loess hills and
- gullies[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
 [25] 许小明. 黄土丘陵区不同植被恢复方式的土壤生态水文效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
 - XU Xiaoming. Soil eco-hydrological effects of different vegetation restoration patterns in the Loess Hilly Region[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [26] 刘卓昕, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的 影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 206-213.
 - LIU Zhuoxin, GAO Peng, MU Xingmin, et al. Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in Loess Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 206-213.
- [27] 马雪燕. 植被恢复对黄土高原沟壑区产流模式的驱动效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
 - MA Xueyan. Drive effect of vegetation restoration on the mode of production and flow pattern of the loess high ravine area[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- 28] 邱德勋. 黄土丘陵区植被恢复对土壤水文特性与土壤入渗的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
 - QIU Dexun. Effect of vegetation restoration on soil hydrological properties and soil infiltration in loess hilly region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.

Change in groundwater drought and its consequence for vegetation in the Middle Reaches of the Yellow River Basin

HUANG Runze, WU Rong, ZHANG Sance, LAN Pengfei, YAO Ning*
(Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: [Background and Objective] Groundwater is a vital resource in the Middle Reaches of the Yellow River basin, crucial for maintaining soil and water ecological functions. However, its depletion due to insufficient supply and excessive consumption has led to groundwater drought. Amidst the increasing demand for groundwater in the region, uncertainties persist regarding its ability to meet ecological and consumption demand. Evaluating groundwater drought is hence imperative to ensure sustainable development of the region. This study aims to assess the spatiotemporal evolution in groundwater drought and its consequence for vegetation growth. [Method] This study was based on the GRACE/GRACE-FO data and GLDAS data measured from April 2002 to December 2021 in the Middle Reaches of the Yellow River Basin, from which we analyzed the groundwater storage anomaly and estimated the standardized groundwater drought index (SGDI). The spatiotemporal variation in groundwater drought was calculated using the run theory, the modified Mann-Kendall trend test, and the Spearman correlation analysis. The impact of vegetation on groundwater drought and its determinants was analyzed using detrended NDVI. [Result] ① Temporally, terrestrial water storage anomaly, surface water storage anomaly and groundwater storage anomaly in the basin changed at the rates of -0.022 mm/d, 0.005 mm/d, and -0.027 mm/d, respectively. Spatially, terrestrial water storage anomaly and groundwater storage anomaly were distributed unevenly in the basin. 2 Temporal variation in groundwater drought in the basin had been in increase, with a total of 65 months occurring drought during the studied period, including six severe droughts and fourteen extreme droughts. Between 2016 and 2021, there were multiple consecutive groundwater droughts, including severe and extreme droughts after 2018. The most extreme drought from 2002 to 2021 was in October 2021. The Theil-Sen slope of SGDI in the basin was -4.10×10^{-4} /d, which passed the MMK trend test, indicating there is a significant increasing trend of groundwater drought in the future. 3 In October 2021, the proportion of drought-affected areas in the basin were 95.81%, in which 64.66% were extreme drought. The Theil-Sen slope of SGDI varied spatially in the range of -0.014 to 0.007 per month. The groundwater drought in the north and east of the basin had increased significantly, with areas reaching 63.02% and drought tendency increasing from the southwest to the northeast. 4 The driving effect of vegetation changes on groundwater drought is not significant. [Conclusion] Groundwater drought in the Middle Reaches of the Yellow River Basin has intensified, characterized by an expanded drought areas, increased drought events, and a significant upward trend in drought. Groundwater drought did not result in a significant impact on vegetation. These findings underscore the urgent need to protect groundwater resource and mitigate its adverse impact on ecology and socio-economic development of the region.

Key words: GRACE; groundwater drought index; temporal and spatial changes; cause analysis; Middle Reaches of the Yellow River Basin

责任编辑: 白芳芳