

河南省陆地水储量动态演变及其驱动机制研究

黄继超^{1,2,3}, 邓晓颖^{1,2,3}, 齐玉峰^{1,2,3}, 赵金花^{1,2,3}, 王攀科^{1,2,3}

(1. 河南省地质局生态环境地质服务中心; 2. 河南省矿山环境生态修复工程技术研究中心;
3. 河南省地热能开发工程技术研究中心)

摘要:为探究气候与人类活动协同作用对河南省陆地水储量(TWS)的影响机制,集成 2003—2022 年 GRACE/GRACE-FO 重力卫星与气象观测数据,构建了融合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 趋势检验及最优参数地理探测器模型的多维分析框架,揭示了河南省 TWS 时空演变规律及驱动机制。结果表明:TWS 年际变化呈先减后增趋势,下降速率为 -1.279 mm/a ,并伴随显著季节性波动;2004 年丰水年降水补给促使 TWS 达到峰值(25.25 mm),2019 年极端干旱事件导致 TWS 降至历史低值(-27.42 mm);空间分布上,TWS 呈西南高、东北低的格局,黄河流域与海河流域因干旱及地下水超采成为显著衰退区,而淮河流域通过跨流域调水和生态修复有效减缓了 TWS 下降趋势;降水是 TWS 变化的主导因素,但气温与高程的贡献率自 2015 年以来显著增强,反映出气候变暖与人类活动的叠加影响;多因子交互作用呈现非线性增强特征,降水与高程及气温与潜在蒸散发组合的解释力远超单因子,揭示了自然-人为因素协同调控 TWS 的复杂机制。

关键词:陆地水储量;GRACE/GRACE-FO;多因子交互作用;偏相关分析;地理探测器;河南省

Research on dynamic evolution and driving mechanisms of terrestrial water storage in Henan Province//Huang Jichao^{1,2,3}, Deng Xiaoying^{1,2,3}, Qi Yufeng^{1,2,3}, Zhao Jinhua^{1,2,3}, Wang Panke^{1,2,3} (1. Henan Geological Bureau Ecological Environment Geological Service Center; 2. Henan Province Mining Environment Ecological Restoration Engineering Technology Research Center; 3. Henan Province Geothermal Energy Development Engineering Technology Research Center)

Abstract: To investigate the synergistic impacts of climate change and human activities on terrestrial water storage (TWS) in Henan Province, this study integrated GRACE/GRACE-FO gravity satellite data and meteorological observations from 2003 to 2022. A multi-dimensional analytical framework was established by combining Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall significance test, and the optimal parameters-based geographical detector model, to reveal the spatiotemporal evolution and driving mechanisms of TWS in Henan Province. The results show that the interannual variation of TWS exhibited a trend of decreasing first and then increasing, with a declining rate of -1.279 mm/a and significant seasonal fluctuations. Precipitation recharge in the wet year of 2004 pushed TWS to its peak (25.25 mm), while the extreme drought event in 2019 reduced TWS to a historical low value (-27.42 mm). Spatially, TWS presented a pattern of high values in the southwest and low values in the northeast. The Yellow River Basin and Hai River Basin became regions with significant TWS depletion due to drought and groundwater overexploitation, whereas the Huai River Basin effectively mitigated the TWS decline through inter-basin water transfer and ecological restoration. Precipitation was the dominant factor controlling TWS variation, but the contribution rates of temperature and elevation have increased significantly since 2015, reflecting the combined effects of climate warming and human activities. The interaction of multiple factors showed nonlinear enhancement, and the explanatory power of combinations such as precipitation-elevation and temperature-potential evapotranspiration far exceeded that of single factors, revealing the complex mechanism by which natural and anthropogenic factors synergistically regulate TWS.

Key words: terrestrial water storage; GRACE/GRACE-FO; interaction of multiple factors; partial correlation analysis; geographical detector; Henan Province

陆地水储量(terrestrial water storage, TWS)是区域水资源系统的重要组成部分,涵盖地下水、土壤水、地表水(如河流、湖泊和水库)以及冰川与积雪等多种水体形式^[1-2]。TWS 的变化不仅反映了区域

基金项目:2023 年度河南省科技攻关项目(232102320274);2022 年度河南省自然资源科研项目(2022-3);2024 年度中心科技创新基金项目(2024KC03)

作者简介:黄继超(1985—),男,高级工程师,主要从事水文地质研究。E-mail:yxhuangchao@163.com
通信作者:邓晓颖(1972—),男,正高级工程师,硕士,主要从事水文地质研究。E-mail:515016938@qq.com

水文循环输入(如降水、径流)与输出(如蒸散发、人类用水)之间的动态平衡,还对生态系统稳定性和社会经济可持续发展具有深远影响^[3]。流域交汇区作为水文循环的关键节点,水体交换频繁,水资源时空分布复杂,其 TWS 动态演变研究对区域水资源安全、粮食生产和生态保护具有重要的理论与实践价值^[4]。

传统 TWS 研究方法主要依赖地面监测站点和水文模型,但受限数据空间分布不均、监测成本高以及模型参数化不确定性等问题,难以实现大范围、长时间序列的精准监测^[5]。2002 年,美国国家航空航天局(NASA)与德国航空航天中心(DLR)联合发射的重力恢复与气候实验卫星(GRACE)为全球和区域尺度 TWS 监测提供了革命性技术手段^[6],通过观测地球重力场变化反演 TWS 时空分布,有效弥补了传统监测方法的不足^[7]。基于 GRACE 及后续 GRACE-FO 卫星数据,学者们已在全球多个区域开展 TWS 变化研究,证实不同区域 TWS 演变特征及驱动机制存在显著差异:中国北方地区 TWS 以减少为主,南方地区呈增加趋势^[8];降水是西北地区和天山山区 TWS 季节性变化的主要驱动因素^[9];长江流域 TWS 与植被覆盖变化呈现强相关性^[10];青藏高原 TWS 变化则主要受降水和蒸散发共同控制^[11]。然而,针对多流域交汇的特殊区域,现有研究多聚焦于单一流域或短期观测,缺乏多源数据融合与驱动因子交互作用的系统性分析,难以揭示复杂水文过程的演变规律。

河南省地处黄河、淮河、海河和长江四大流域交汇区,是中国重要的粮食生产基地和人口密集区,水资源状况直接关系到区域经济发展和生态安全^[12]。近年来,受气候变化加剧和人类活动强度提升的双重影响,河南省水资源供需矛盾日益突出^[13]。黄河流域水资源过度开发导致地下水位持续下降^[14-15],淮河流域水污染问题制约水资源可利用性^[16],南水北调工程的实施虽缓解了部分用水压力,却也重塑了区域水文循环与 TWS 空间分布^[17-18],使得该区域 TWS 变化呈现显著时空异质性,但其驱动机制尚未得到系统解析。因此,深入研究河南省 TWS 的时空演变规律及其驱动机制,对于制定科学的水资源管理政策、保障区域粮食安全与生态安全、实现可持续发展具有重要意义。

本文基于 2003—2022 年 GRACE/GRACE-FO 卫星数据与气象资料,结合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 趋势检验、非线性偏相关分析及最优参数地理探测器(optimal parameters-based geographical detector,OPGD)模型,研究河南省 TWS

的时空演变规律及其对气候波动与人类活动的响应机制以及多驱动因子(如降水、气温、地形和人类活动)对 TWS 变化的交互作用及其非线性效应,期为河南省水资源管理提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河南省(31°23'N~36°22'N, 110°21'E~116°39'E)位于我国中部,东连安徽、山东,北接河北、山西,西邻陕西,南靠湖北,处于我国地势二、三级阶梯过渡地带(图 1)。研究区属温带大陆性季风气候,地形地貌多样,西高东低,中部和东部为黄淮海平原。境内河流水系发达,分属四大流域。黄河流域横贯中部,是重要水源,深刻影响 TWS;淮河流域覆盖东南部大部分地区,支流多、水量丰;海河流域涉及豫北部分区域,对水资源调配意义重大;西南部少量地区属于长江流域,四大流域交织成复杂水系网络。河南省是人口与农业大省,农业在经济中占重要地位。随着工业化和城市化推进,工业与城市居民生活用水需求不断增加。河南省地理、气候、地形、水系及社会经济状况共同对 TWS 产生复杂影响。

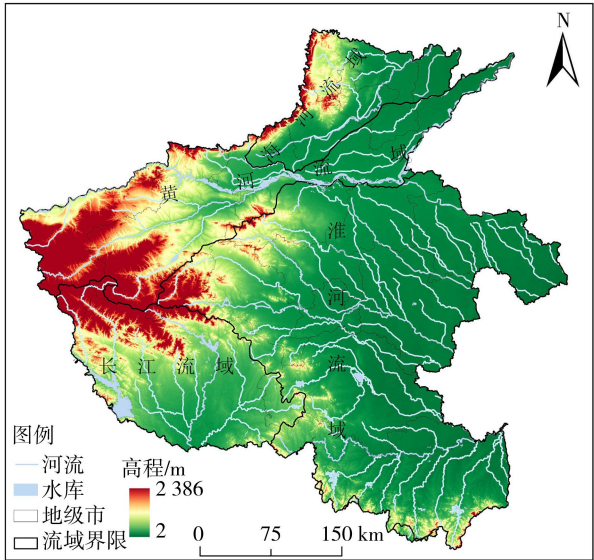


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源与预处理

本文 TWS 数据选用“中国区域连续逐月的陆地水储量数据”(2003—2022 年),该数据来源于 GRACE 和 GRACE-FO,格式为 NetCDF,空间分辨率为 0.5°×0.5°,采用 SSA-PCA(singular spectrum analysis-principal component analysis)方法填补缺失数据,数据精度及适用性良好。气象数据选用 2003—2022 年气温和降水数据,来自国家地球系统科学数据中心(www.geodata.cn)1901—2023 年中

国 1 km 分辨率数据。潜在蒸散发数据来自国家青藏高原科学数据中心 (www. tpdc. ac. cn) 1901—2023 年数据,空间分辨率均为 1 km×1 km。DEM 数据来源于地理空间数据云 (www. gsccloud. cn),空间分辨率为 30 m,格式为 tif,用 ArcGIS Pro 提取其海拔和坡度信息。水源涵养量和水土保持量数据来自生态气象业务云服务平台 (em. cams. cma. cn)。人口密度数据来自资源环境科学数据平台 (www. resdc. cn),空间分辨率为 1 km×1 km。以上数据均基于 ArcGIS Pro 3.2 平台,分辨率统一设定为 1 km×1 km,坐标系统一为 WGS84,时间范围裁剪为 2003—2022 年。

2 研究方法

2.1 Theil-Sen Median 趋势分析

采用 Theil-Sen Median 趋势分析方法^[19-20],对 2003—2022 年月尺度 TWS 时间序列数据进行趋势量化分析,计算研究区域 TWS 的变化速率,明确其时间维度上的增减变化特征,为后续趋势显著性判断提供基础数据支撑。

2.2 Mann-Kendall 趋势检验

结合 Mann-Kendall 趋势检验方法^[21],对 Theil-Sen Median 趋势分析得到的 TWS 变化趋势进行显著性检验,通过计算统计量 Z 值,依据相关评价标准^[22]判断 TWS 增减趋势的显著程度,区分微显著、显著和极显著变化等级。

2.3 偏相关分析

采用偏相关分析方法探究气象因素与 TWS 的关联性,重点分析气温、降水及潜在蒸散发与 TWS 的线性相关关系,同时排除其他气象因素的干扰。采用 t 检验验证偏相关关系的显著性,设定显著性水平 $p<0.05$,以明确各气象因素对 TWS 变化的影响程度及关联性。

2.4 地理探测器

基于王劲峰等^[23]提出的传统地理探测器,采用 Song 等^[24]优化的 OPGD 模型开展研究。该模型针对改进的传统地理探测器在离散方法与分类数量上的不足,通过整合自然间断点、等间隔、标准差等多种连续变量离散化策略,设定 3~10 类合理分类区间,有效降低过度分类带来的分析偏差,提升研究效能。该模型包含的因子探测器与交互探测器模块协同支撑本文研究。因子探测器用于量化气象、地形等单一影响因子对 TWS 空间分布的贡献度,助力识别 TWS 空间分异的主导因子;交互探测器则聚焦两个及以上因子的协同作用,通过计算单一因子影响程度及因子交互后综合影响程度,明确多因子交互

作用对 TWS 空间分布的影响程度。

2.5 影响因子选取与数据处理

基于自然-社会二元驱动框架,选取 2003 年、2013 年和 2022 年 3 个典型时间节点,结合水量平衡、下垫面特征及人类活动维度,参考相关研究^[25],遴选出 8 个核心驱动因子,包括高程、坡度、年平均气温、年平均降水量、潜在蒸散发量 5 个自然因子和水源涵养指数、水土保持能力、人口密度 3 个社会因子。年平均气温、年平均降水量、潜在蒸散发量直接影响 TWS 时空分布^[26];高程、坡度通过调控径流与下渗影响水储量分配^[27];水源涵养指数、水土保持能力反映植被、土壤对水储量的调节作用^[28];人口密度通过人类取水及土地利用改变水文过程,进而影响 TWS。

为适配地理探测器模型、保障分析精度,采用如下数据处理步骤:①渔网构建。基于 ArcGIS Pro 3.2 构建 10 km×10 km 等面积渔网,提取 165 732 个有效采样点,结合克里金插值与核密度估计消除数据源异质性边界效应,保障 TWS 与驱动因子空间匹配精度。②连续变量离散化优化。采用 OPGD 模型对年平均气温、年平均降水量、潜在蒸散发量进行离散化,通过多分类方法对比确定最优方案。③交互作用与非线性检测。依托 RStudio 2024.1 的 GD 包开展多因子交互探测,支撑地理探测器交互分析。

3 结果与分析

3.1 TWS 时间变化

3.1.1 月尺度 TWS 变化特征

研究区 TWS 呈现显著的季节性波动(图 2)。基于 2003—2022 年观测期内月均等效水高数据,TWS 月均最大值出现在 10 月(1.448 mm),最小值出现在 6 月(-2.871 mm),极差达 4.319 mm,表明区域 TWS 对气候与农业用水驱动因子具有高度敏感性。其季节性变化表现为:1—3 月冬至至春季 TWS 维持在 0.286~0.384 mm 之间,呈微弱增加态势;4—6 月受融雪径流消退、春灌溉水及夏季干旱影

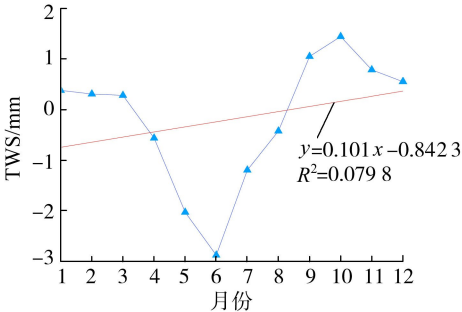


图 2 TWS 月平均值变化特征

Fig. 2 Monthly average variation characteristics of TWS

响,TWS 以 1.156 mm/月的速率骤减至年度低谷;7—10 月随秋季降水补给与农业休耕储水,TWS 逐步回升至 10 月峰值;11—12 月受低温抑制蒸散发影响,TWS 维持相对稳定的高位波动。整体来看,研究期内 TWS 月均变化呈微弱增加趋势,季节性波动是主导其年内分配的核心特征。

3.1.2 年尺度 TWS 变化特征

2003—2022 年研究区年尺度 TWS 极值、均值及标准差均呈现显著下降趋势与年际波动特征(图 3),年均 TWS 以-1.279 mm/a 的速率显著递减(决定系数 $R^2=0.7556$),表明区域水储量整体呈持续亏缺态势;年最小 TWS 由 2004 年的-0.33 mm 持续减小至 2019 年的-27.42 mm,2020 年仍维持在-26.83 mm 的低位,2021—2022 年虽有所回升但仍显著低于 2003—2012 年的均值;年最大 TWS 则由 2004 年峰值 25.25 mm 逐步回落至 2022 年的 5.00 mm,体现出极值序列的非对称性衰减特征;年均 TWS 于 2015 年出现关键水文转折点,2003—2014 年均值为 6.02 mm,呈弱波动状态,2015—2022 年均值减小至-8.67 mm,降幅达 244%,与区域地下水超采、极端干旱及蒸散发增强的叠加效应密切相关;年 TWS 标准差由 2009 年的 1.57 mm 逐步攀升至 2020—2021 年的 9.08 mm,达到观测期峰值,对应 2019 年极端干旱与 2020 年黄河流域超量级洪水的旱涝急转过程,水储量系统离散度显著提升,反映出全球变暖背景下区域水资源系统的不稳定性加剧。

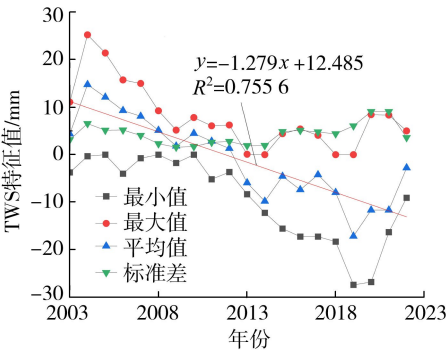


图 3 2003—2022 年 TWS 特征值年际变化

Fig.3 Interannual variation of TWS eigenvalues from 2003 to 2022

3.2 TWS 空间变化

3.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析

基于 Theil-Sen Median 趋势分析结果(图 4),研究区 TWS 变化速率介于-0.069~ -2.766 mm/a,整体呈水文衰退状态且空间分异显著。海河流域 TWS 衰减速率为-2.50±0.38 mm/a,与地下水超采强度呈强负相关关系,豫北平原区衰减速率达

-2.76 mm/a,超出临界超采阈值 84%;黄河流域衰减速率为-1.78±0.29 mm/a,衰减热点与高强度灌溉区高度耦合,TWS 与归一化植被指数呈显著负相关关系,印证了农业扩张的胁迫效应;淮河流域衰减速率为-1.20±0.21 mm/a,呈南缓北陡格局,南部山区因森林截留效应衰减较缓,北部平原区因城市化形成地表径流减少与地下水超采并存的格局;长江流域衰减速率为-0.65±0.15 mm/a,为四大流域最低,局部异常与南水北调中线工程的径流再分配效应相关。

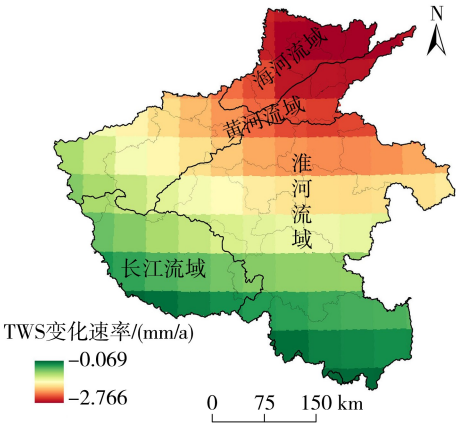


图 4 Theil-Sen Median 趋势分析结果

Fig.4 Results of Theil-Sen Median trend analysis

3.2.2 Mann-Kendall 趋势检验

根据 Mann-Kendall 趋势检验结果(图 5),研究区 TWS 减少趋势的显著性与流域单元高度耦合。极显著减少区占研究区面积的 82.98%,海河流域、黄河流域全域均属此区,淮河流域 86.92%的面积也属此区,集中反映了地下水超采、高强度灌溉与城市化的共同胁迫;显著减少区占 6.76%,仅分布于长江流域,淮河流域仅有零星分布;微显著减少区占 10.26%,主要分布于长江流域和淮河流域南部山区,该区域受自然变率影响较大、人为干扰较弱。整

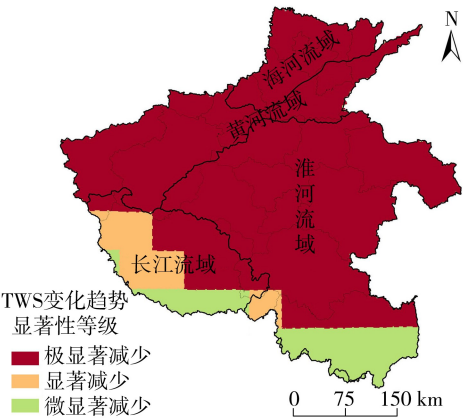


图 5 Mann-Kendall 趋势检验结果

Fig.5 Results of Mann-Kendall trend test

体来看,TWS 水文衰退是覆盖研究区绝大部分区域、衰减幅度显著的全局性问题。

3.2.3 偏相关分析

采用偏相关分析方法系统评估 2003—2022 年 TWS 与关键气象因子(降水量、气温、潜在蒸散发量)的响应关系(图 6)。全域尺度偏相关分析表明,TWS 变化受降水量(相关系数 $r = 0.62, p < 0.05$)、气温($r = -0.48, p < 0.05$)和潜在蒸散发($r = -0.35, p < 0.05$)的联合驱动,影响强度由强到弱依次为降水量、气温、潜在蒸散发。空间上,气象因子与 TWS 的偏相关系数呈现显著异质性。降水量与 TWS 呈东南—西北向梯度变化($r = 0.12 \sim 0.85, p < 0.05$),淮河上游及长江流域东部的强正相关区($r > 0.65$)得益于降水量为 1000 mm 以上充沛的降水补给,而黄淮海平原北部相关性显著减弱($r < 0.3$),系人类取水活动干扰所致;气温与 TWS 的双向响应特征明显($r = -0.71 \sim 0.58$),伏牛山—大别山区气温升高促进冰雪融水导致 TWS 增加,华北平原则因气温上升加剧蒸散发导致 TWS 减少,揭示了地形对气候与 TWS 关系的调控作用;潜在蒸散发与 TWS 呈典型“三明治”空间格局($r = -0.82 \sim 0.23$),豫西伏牛山及豫南大别山区的强负相关区($r < -0.7$)与高海拔强蒸散发过程一致,平原区相关性较弱则与灌溉等人为水分输入有关。从时间动态来看,2003—2013 年研究区气候变暖导致蒸散发增强,抵消了降水增加对 TWS 的正向补给效应,这与气候-

水文反馈失衡理论相吻合。

3.3 基于地理探测器的 TWS 驱动因素分析

3.3.1 单因子探测

利用 OPGD 模型分析各因子对河南省 TWS 的解释力(q 值),结果如表 1 所示。选取 2003 年、2013 年和 2022 年为代表年份,将驱动因子输入 OPGD 模型,用 R 语言代码进行单因子探测,得出各因子对相应年份 TWS 的解释度。横向对比结果显示,2003 年各因子对 TWS 的解释力从高到低依次为:降水量、高程、气温、潜在蒸散发、水源涵养量、人口密度、坡度、水土保持量;2013 年排序变为:气温、降水量、水源涵养量、潜在蒸散发、高程、人口密度、水土保持量、坡度;2022 年排序再次调整为:高程、气温、潜在蒸散发、坡度、水土保持量、人口密度、水源涵养量、降水量。这些变化表明,不同时间段内影响 TWS 的主要驱动因子因自然环境变化和人类活动差异而有所不同。

3.3.2 交互作用

图 7 为 2003 年、2013 年和 2022 年不同驱动因子间交互作用结果。不同驱动因子间交互作用存在差异,相较于单因子,双因子交互解释力均增强,体现出多因子交互作用对 TWS 变化的非线性增强效应。选定自变量 x_1 (高程)、 x_2 (坡度)、 x_3 (气温)、 x_4 (降水量)、 x_5 (潜在蒸散发)、 x_6 (水源涵养量)、 x_7 (水土保持量)、 x_8 (人口密度),筛选代表年份中交互作用最强的 3 个组合。从图 6 可以看出,2003 年交互

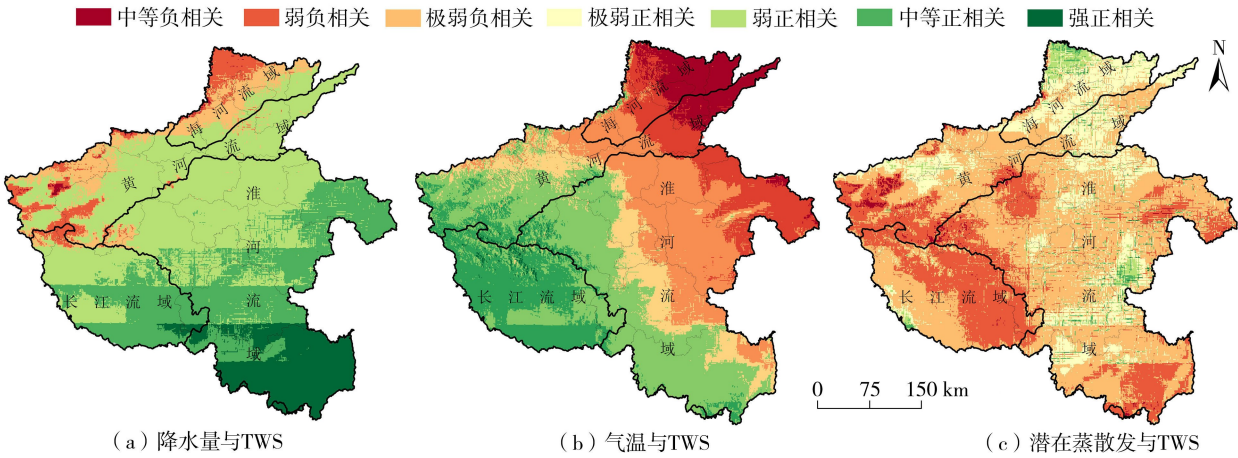


图 6 TWS 与气象要素相关性分布

Fig. 6 Correlation distribution of TWS and meteorological elements

表 1 不同时期驱动因子对 TWS 变化的解释力对比

年份	q 值							
	高程	坡度	气温	降水量	潜在蒸散发	水源涵养量	水土保持量	人口密度
2003	0.3224	0.0709	0.3061	0.3662	0.2414	0.2333	0.0620	0.1333
2013	0.0902	0.0025	0.5635	0.5525	0.2046	0.2675	0.0138	0.0263
2022	0.7275	0.2351	0.3261	0.1396	0.2411	0.1430	0.2229	0.2011

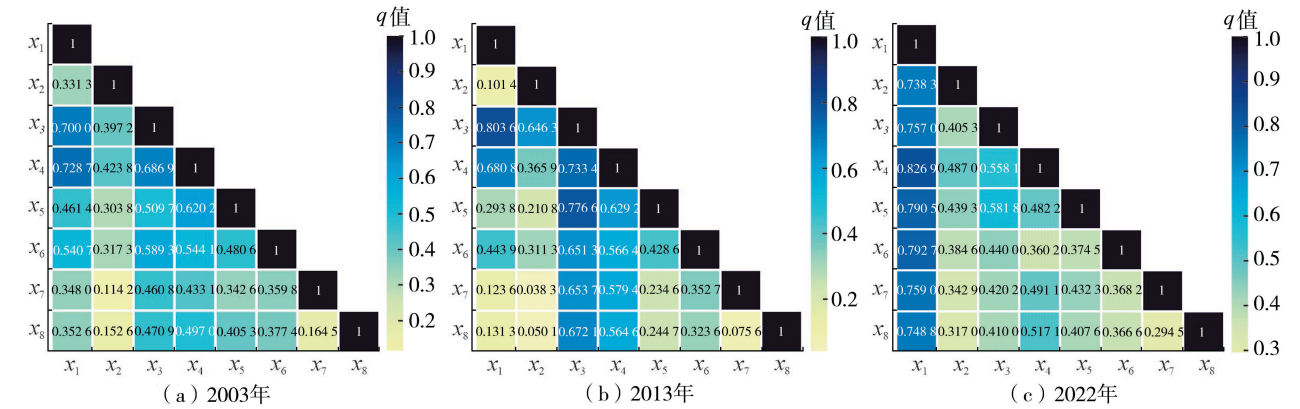


图7 驱动因子交互作用结果

Fig.7 Interaction results of driving factors

作用最强的3个组合是高程与降水量($q_{14}=0.7287$)、高程与气温($q_{13}=0.7000$)、气温与降水量($q_{34}=0.6869$),反映出地形对降水再分配的关键作用,与该年份降水量为首要驱动因子的特征相契合;2013年变为高程与气温($q_{13}=0.8036$)、气温与潜在蒸散发($q_{35}=0.7766$)、气温与降水量($q_{34}=0.7334$),印证了气温升高-蒸散加剧-土壤干旱的正反馈机制,与该年份气温为首要驱动因子的结果一致;2022年变为高程与降水量($q_{14}=0.8269$)、高程与水源涵养量($q_{16}=0.7927$)、高程与潜在蒸散发($q_{15}=0.7905$),反映出生态恢复工程通过改变下垫面水源涵养能力重塑了地形-水循环相互作用格局,与该年份高程为首要驱动因子的特征相匹配。这种交互作用的时空动态为理解自然-人为耦合系统的复杂性提供了新视角,也进一步解释了不同时期TWS驱动因子排序变化的内在原因。

4 结 论

- a. 2003—2022年研究区TWS呈现显著时空波动特征,年内受气候节律与人类活动调控,表现出明显季节性差异,月均最大值为1.448 mm、最小值为-2.871 mm,分别出现在10月和6月;年际呈显著衰退态势,衰减速率达-1.279 mm/a,2015年为关键水文转折点,此后衰减加剧,2019年达到最小值-27.42 mm,2020—2022年虽有小幅回升,但储水系统恢复力受损,不稳定性显著增强。
- b. 研究区TWS空间分异显著,全域均呈水文衰退状态,衰减速率介于-0.069~-2.766 mm/a,其中海河流域衰减最快,长江流域衰减最慢。研究区82.98%的区域呈极显著衰减,主要对应地下水超采集中区;长江流域、淮河流域南部山区等生态屏障区呈微显著衰减,且受气候自然变率主导,TWS分布与人类耗水、地面沉降呈现显著协同性。
- c. 研究区TWS变化受自然与人类活动共同驱

动,气象因子影响强度依次为降水量、气温、潜在蒸散发,且存在明显空间双向响应特征。多因子交互解释力优于单因子,其主导组合随时间发生演变,驱动核心从2003年降水量主导的气候驱动,逐步转变为2022年高程主导的地形驱动,人类活动通过重塑下垫面进一步强化了自然因子的交互效应。

参考文献:

[1] 王瑞,陈泽坤,逯静. 基于VMD和IBA-LSSVM的短期风电功率预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(6):575-582. (Wang Rui, Chen Zekun, Lu Jing. Short term prediction of wind power based on VMD and IBA-LSSVM[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(6):575-582. (in Chinese))

[2] Jiang Zhongshan, Hsu Y I, Yuan Linguo, et al. Monitoring time-varying terrestrial water storage changes using daily GNSS measurements in Yunnan, Southwest China[J]. Remote Sensing of Environment, 2021,254:112249.

[3] Dill R, Dobszlaw H. Numerical simulations of global-scale high-resolution hydrological crustal deformations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013,118(9):5008-5017.

[4] 职露,胡涛,邹滨,等. 河南省植被NPP时空分异及其驱动因子[J]. 自然资源遥感, 2023,35(4):169-177. (Zhi Lu, Hu Tao, Zou Bin, et al. Spatio-temporal differentiation of vegetation net primary productivity in Henan Province as well as its driving factors[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023,35(4):169-177. (in Chinese))

[5] 冉将军,闫政文,吴云龙,等. 下一代重力卫星任务研究概述与未来展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023,48(6):841-857. (Ran Jiangjun, Yan Zhengwen, Wu Yunlong, et al. Research status and future perspectives in next generation gravity mission[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023,48(6):841-857. (in Chinese))

- [6] 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 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. (in Chinese))
- [7] Yang Xinghai, Yuan Linguo, Jiang Zhongshan, et al. Investigating terrestrial water storage changes in Southwest China by integrating GNSS and GRACE/GRACE-FO observations[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023,48:101457.
- [8] 涂梦昭,刘志锋,何春阳,等. 基于 GRACE 卫星数据的中国地下水储量监测进展[J]. 地球科学进展, 2020,35(6):643-656. (Tu Mengzhao, Liu Zhifeng, He Chunyang, et al. Research progress of groundwater storage changes monitoring in China based on GRACE satellite data[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(6): 643-656. (in Chinese))
- [9] 李武东,郭金运,常晓涛,等. 利用 GRACE 重力卫星反演 2003—2013 年新疆天山地区陆地水储量时空变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017,42(7):1021-1026. (Li Wudong, Guo Jinyun, Chang Xiaotao, et al. Terrestrial water storage changes in the Tianshan Mountains of Xinjiang measured by GRACE during 2003-2013[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017,42(7):1021-1026. (in Chinese))
- [10] 李晓英,叶根苗,蔡晨凯,等. 基于 GRACE 和 MODIS 数据的长江流域陆地水储量变化分析及预测[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 130-135. (Li Xiaoying, Ye Genmiao, Cai Chenkai, et al. Analysis and prediction of the anomaly of terrestrial water storage in the Yangtze River Basin based on MODIS and GRACE [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018,35(5): 130-135. (in Chinese))
- [11] 韩煜娜,左德鹏,王国庆,等. 变化环境下青藏高原陆地水储量演变格局及归因[J]. 水资源保护, 2023, 39(2):199-207. (Han Yu'na, Zuo Depeng, Wang Guoqing, et al. Evolution pattern and attribution analysis of terrestrial water storage in Tibetan Plateau under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2):199-207. (in Chinese))
- [12] 冯伟,王长青,穆大鹏,等. 基于 GRACE 的空间约束方法监测华北平原地下水储量变化[J]. 地球物理学报, 2017,60(5):1630-1642. (Feng Wei, Wang Changqing, Mu Dapeng, et al. Groundwater storage variations in the North China Plain from GRACE with spatial constraints [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(5):1630-1642. (in Chinese))
- [13] 龙笛,杨文婷,孙章丽,等. 海河平原地下水储量变化的重力卫星反演和流域水量平衡[J]. 水利学报, 2023,54(3):255-267. (Long Di, Yang Wenting, Sun Zhangli, et al. GRACE satellite-based estimation of groundwater storage changes and water balance analysis for the Haihe River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(3):255-267. (in Chinese))
- [14] 王幸,张晓力,刘翔宇. 黄河流域环境规制对水资源利用效率的影响研究[J]. 水利经济, 2024,42(6):43-49. (Wang Xing, Zhang Xiaoli, Liu Xiangyu. Research on impact of environmental regulations on water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 43-49. (in Chinese))
- [15] 刘紫莹,周冰玉,李志威,等. 黄河源区典型泥炭湿地地下水水位时空变化及流量过程[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 27-33. (Liu Zixuan, Zhou Bingyu, Li Zhiwei, et al. Spatiotemporal change of groundwater level and discharge process in a typical peatland watershed in source region of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 27-33. (in Chinese))
- [16] 李晓英,吴淑君,王颖,等. 淮河流域陆地水储量与干旱指标分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 80-85. (Li Xiaoying, Wu Shujun, Wang Ying, et al. Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):80-85. (in Chinese))
- [17] 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 Qiuyan, Pan Yun, Gong Huili, et al. Spatiotemporal analysis of GRACE-based groundwater storage variation in North China Plain [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2018, 30(2): 132-137. (in Chinese))
- [18] 徐章星,刘滨,张兵. 南水北调工程与受水区县域高质量发展:新结构经济学视角下的临清例证[J]. 水利经济, 2025,43(5):41-50. (Xu Zhangxing, Liu Bin, Zhang Bing. The South-to-North Water Diversion Project and high-quality development of counties in water-receiving areas: example of Linqing under the new structural economics [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025,43(5):41-50. (in Chinese))
- [19] Mu Yaqiong, Wei Yanqiang, Wu Jinkui, et al. Variations of mass balance of the Greenland Ice Sheet from 2002 to 2019 [J]. Remote Sensing, 2020,12(16):2609.
- [20] Raj R P, Andersen O B, Johannessen J A, et al. Arctic sea level budget assessment during the GRACE/Argo time period [J]. Remote Sensing, 2020,12(17):2837.
- [21] 徐珂,陈炼钢,吴树诚,等. 1983—2023 年漓江上游降雨时空演变特征精细解析[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(4):85-93. (Xu Ke, Chen Lian'gang, Wu Shucheng, et al. Detailed analysis of spatiotemporal evolution

- characteristics of rainfall in the upper Lijiang River Basin from 1983 to 2023 [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 85-93. (in Chinese))
- [22] Jing Wenlong, Zhao Xiaodan, Yao Ling, et al. Variations in terrestrial water storage in the Lancang-Mekong River Basin from GRACE solutions and land surface model[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 580: 124258.
- [23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. (Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [24] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [25] 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 Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 26-32. (in Chinese))
- [26] 夏婷婷, 薛璇, 王灏伟, 等. 昆仑山北坡陆地水储量变化及其驱动因素分析[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(8): 1292-1303. (Xia Tingting, Xue Xuan, Wang Haowei, et al. Changes in terrestrial water storage and its drivers on the north slope of Kunlun Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(8): 1292-1303. (in Chinese))
- [27] 王晟, 田琳, 李峰平, 等. 松花江流域陆地水储量时空变异特征与影响因素探究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(10): 47-58. (Wang Sheng, Tian Lin, Li Fengping, et al. Characteristics and influencing factors of spatial-temporal variation of land water reserves in Songhua River Basin [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(10): 47-58. (in Chinese))
- [28] 徐鹏飞, 蒋涛, 章传银, 等. GRACE/GRACE-FO 空窗期的陆地水储量变化数据间断补偿: 以全球典型流域为例[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(9): 3048-3067. (Xu Pengfei, Jiang Tao, Zhang Chuanyin, et al. Data filling of terrestrial water storage anomaly during the gap period of GRACE/GRACE-FO: a case study of global typical basins [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 3048-3067. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-21 编辑: 施业)

(上接第 131 页)

- [21] 何玉芬, 杨汉波, 董宁澎, 等. 分布式水文模型与自回归误差校正相结合的低枯流量预报研究[J]. *水利学报*, 2024, 55(12): 1539-1547. (He Yufen, Yang Hanbo, Dong Ningpeng, et al. Research on low flow forecast based on a distributed hydrological model and autoregressive error correction [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(12): 1539-1547. (in Chinese))
- [22] 贺娟, 王晓松, 王彩云. 加权马尔可夫链模型在密云水库入库流量中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(4): 618-621. (He Juan, Wang Xiaosong, Wang Caiyun. Application of the weighted Markov chain model in the inflow prediction of the Miyun Reservoir [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(4): 618-621. (in Chinese))
- [23] 闫国辉, 乔长录, 陈伏龙. 基于 EMD-WDD-MK 模型的玛纳斯河年径流预测[J]. *中国农村水利水电*, 2021(11): 83-89. (Yan Guohui, Qiao Changlu, Chen Fulong. Annual runoff prediction of Manas River based on EMD-WDD-MK model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(11): 83-89. (in Chinese))
- [24] 杜若愚, 姚成, 刘玉环, 等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6): 25-32. (Du Ruoyu, Yao Cheng, Liu Yuhuan, et al. Grid-Xin' anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(6): 25-32. (in Chinese))
- [25] 王雨洁, 李致家, 姚成, 等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(2): 11-18. (Wang Yujie, Li Zhijia, Yao Cheng, et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(2): 11-18. (in Chinese))
- [26] Zhang Jinping, Wang Yuhao, Zhao Yong, et al. Multi-scale flood prediction based on GM(1, 2)-fuzzy weighted Markov and wavelet analysis [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2021, 12(6): 2217-2231.
- [27] 李琼芳, 方凯悦, 韩幸烨, 等. 基于多维 Copula 函数的澜沧江-湄公河流域气象干旱特征分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 52-59. (Li Qiongfang, Fang Kaiyue, Han Xingye, et al. Analysis of meteorological drought characteristics in the Lancang-Mekong River Basin based on multi-dimensional copula function [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 52-59. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-07 编辑: 施业)