

联合重力卫星与多源数据华北平原地下水储量演变机制及归因分析

林友兵

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年2月23日; 录用日期: 2026年3月24日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

华北平原(North China Plain, NCP)作为全球地下水消耗最剧烈的区域之一, 其水文系统的演变直接关系到中国的粮食安全与生态稳定。本研究基于Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)及其后续任务(GRACE-FO)的重力卫星数据, 结合了与Mascon数据的空间尺度更为匹配的具有0.25°分辨率的GLDAS 2.1版本数据、ERA5再分析数据及TRMM降雨数据, 构建了高精度的陆地水量平衡方程, 对2002年至2024年间华北平原地下水储量的长序列变化特征进行了系统反演与归因分析。研究发现, 该区域水储量变化在2020年经历了从持续亏损到显著恢复的结构性转折。Prophet模型识别出的“2020-08”变异点, 对应了南水北调中线工程生态补水效应累积与区域治理政策落地的时刻。归因分析表明, 降水(P)的年际波动与极端降水事件(如2021年河南暴雨)对短期储量回升具有显著贡献, 但南水北调工程带来的水源置换效应及严格的地下水压采政策是驱动2020年后地下水长期恢复的主导人为因素。本研究验证了多源卫星遥感数据在区域尺度水资源管理中的应用潜力, 并为华北平原地下水超采治理提供了科学依据。

关键词

地下水储量, GRACE卫星, 华北平原, 南水北调, 驱动机制

Mechanisms and Attribution of Groundwater Storage Evolution in the North China Plain via Integrated Gravity Satellite and Multi-Source Data

Youbing Lin

School of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: February 23, 2026; accepted: March 24, 2026; published: April 30, 2026

作者简介: 林友兵, 出生于2002年8月1日, 籍贯: 江西赣州, 硕士研究生, 研究方向: 地下水, Email: 3468126106@qq.com

文章引用: 林友兵. 联合重力卫星与多源数据华北平原地下水储量演变机制及归因分析[J]. 水资源研究, 2026, 15(2): 167-176.
DOI: 10.12677/jwrr.2026.152020

Abstract

As one of the world's most intensive zones of groundwater depletion, the evolution of the hydrological system in the North China Plain (NCP) directly impacts food security and ecological stability. Utilizing gravimetry data from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and its Follow-On (GRACE-FO) missions, integrated with GLDAS 2.1, ERA5 reanalysis, and TRMM precipitation data—specifically selected for their 0.25° high resolution that aligns with the spatial scale of Mascon solutions, this study constructs a high-precision terrestrial water balance equation and systematically retrieves and conducts an attribution analysis of the long-term variations in groundwater storage (GWS) across the NCP from 2002 to 2024. Results indicate that GWS in the region underwent a structural shift in 2020, transitioning from a state of continuous depletion to significant recovery. The change point of “August 2020”, identified by the Prophet model, coincides with the cumulative effects of ecological water replenishment from the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project (SNWDP) and the effective implementation of regional governance policies. Attribution analysis demonstrates that while inter-annual fluctuations in precipitation (P) and extreme precipitation events (e.g., the 2021 Henan rainstorm) significantly contributed to short-term storage rebound, and the water source substitution effect facilitated by the SNWDP and strict groundwater extraction restriction policies were the dominant anthropogenic drivers of the long-term recovery observed after 2020. This study demonstrates the potential of multi-source satellite remote sensing data in regional-scale water resources management and provides a scientific basis for the governance of groundwater over-exploitation in the NCP.

Keywords

Groundwater Storage, GRACE Satellite, North China Plain, SNWD, Driving Mechanism

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

华北平原是中国乃至世界上人口最稠密、农业集约化程度最高的地区之一，有限的水资源赋存量(仅占全国约 1.7%)与农业集约化(支撑全国约 10%的粮食产量)、工业化及城市化带来的高强度用水需求之间存在着严重的不匹配[1]。这种极端的水资源供需矛盾，导致了自 20 世纪 70 年代以来对地下水的长期、大规模超采。

2015 年以前，华北平原的地下水系统处于一种“慢性失血”状态。根据 GRACE 重力卫星的长期监测数据，该区域地下水储量(Groundwater Storage, GWS)以每年约 15~20 毫米等效水高(Equivalent Water Height, EWH)的速度持续下降[2]。这种亏损在空间上表现出显著的异质性：山前平原(如石家庄、保定一带)由于含水层渗透性好且农业开采强度大，形成了深层的地下水降落漏斗；而东部滨海平原虽然开采量相对较小，但也面临着咸水入侵和地面沉降的双重威胁[3]。

长期的地下水超采不仅导致了地下水储量枯竭，还引发生态环境恶化，包括河流断流、湿地萎缩以及不可逆的含水层压密[4]。因此，探究地下水储量的演变趋势，特别是识别其是否出现“拐点”，对于评估区域水安全战略(如南水北调工程)的有效性至关重要。

1.2. 2020 年转折点的发现与意义

近年来的多源观测数据——包括重力卫星反演、地面监测井网以及水文模拟——初步显现出一个值得关注

的现象：华北平原的地下水亏损趋势在 2018~2019 年开始放缓，2020 年前后出现了逆转的现象[5]。这种现象究竟是局部的、受气候变率影响的短暂波动，还是大尺度、持续性的系统结构性恢复，目前仍缺乏基于长时序高精度数据的严格统计学定论。

准确识别地下水储量异常(GWSA)时间序列中的变异点，对于验证区域水文循环是否从“自然降水不足 + 高强度开采”的赤字模式，真正转变为“外调水补充 + 政策性压采 + 极端降水增益”的盈余模式具有决定性意义。本研究的核心目标之一是利用与地理特征高度匹配的 GRACE Mascon 高分辨率产品，结合 Prophet 时间序列模型，识别这一潜在转折点发生的统计显著时刻，深入解析驱动该区域水循环主导机制发生根本性转换的物理基础与政策效应。

1.3. 目标与结构

本研究基于现有数据和图表完成了以下核心任务：

时空演变特征及突变识别：综合利用 GRACE Mascon 产品、GLDAS 水文模型、ERA5 再分析资料及 TRMM 降水数据，系统刻画 2002~2022 年间区域 TWS 与 GWS 的时空演化规律，并利用统计检验方法识别长时序水储量变化的突变转折点(2021 年)。

驱动机制归因与量化：解构 2020 年水储量由降转升转折点的内在成因，重点量化南水北调工程(SNWD)长期的生态补水累积效应，以及农业用水政策调整(休耕、轮作)的贡献率；评估转折点后发生的极端降水事件(如 2021 年河南“7·20”暴雨)对该水储量恢复趋势的放大与巩固作用。

统计变点解析：探讨 Prophet 模型识别出的“2020-08”变异点与物理水文过程及政策实施节点的内在关联。

方法论差异辨析：解释为何使用水量平衡法(WB)估算的 GWSA 趋势可能与 GRACE 或实测井数据存在偏差，分析其背后的误差传播机制。

2. 数据来源与方法论框架

2.1. 卫星重力测量：GRACE/GRACE-FO Mascon 数据

本研究采用的核心数据源为 GRACE 及 GRACE-FO 重力卫星提供的 Level-3 Mascon (Mass Concentration)产品。相较于传统的球谐系数(Spherical Harmonics, SH)方法，Mascon 解算方案通过在反演过程中引入时变重力场的先验约束，有效抑制了传统方法中常见的条带误差，在无需经验去相关滤波的情况下，显著提高了信号的空间定位精度，并大幅减少了信号泄露[6]。

本文选用了德克萨斯大学空间研究中心(CSR)和喷气推进实验室(JPL)发布的 RL06 版本数据。针对华北平原的地理特征，应用了数据产品配套的尺度因子对网格数据进行恢复校正，以弥补因正则化处理而导致的信号幅度衰减，从而获取更真实的陆地水储量变化信号[7]。GRACE 直接观测的是总水储量变化(ΔTWS)，包含了土壤水、地表水、雪水当量及地下水的的所有质量变化。

2.2. 水文气象数据

本研究使用了来自 Global Land Data Assimilation System (GLDAS)的月度全球水储量估算数据[8]，旨在从 GRACE 反演的 TWSA 中分离出地下水储量异常(GWSA)。GLDAS 旨在利用卫星数据和地面观测数据，提供最优的陆面变量和通量数据场[6]。GLDAS 包含四个模型[9]，即 Noah 模型、Variable Infiltration Capacity (VIC)模型、Mosaic 模型和 Community Land Model (CLM)。为了便于与 CSR mascon 模型进行比较，选择了与 GRACE 数据集具有相同空间分辨率(0.25°)的 GLDAS/Noah-2.1 模型。

Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)气象卫星由 NASA 和 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)联合开发，用于定量测量热带和亚热带地区的降水(P) [10]。为了保持与 GRACE 和 GLDAS 数据相同的时空分

分辨率,本研究使用了 TRMM 3B43 月度数据集来获取研究区域的降水变化。该数据集最后更新于 2019 年 12 月,本文结合了来自 GPM 3GPROF 产品数据的 2020 年 1 月至 2023 年 11 月的数据以辅助分析,这些数据已与 TRMM 降水数据尺度进行了统一[11]。

ERA5 是由 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)发布的最新第五代再分析数据,提供了全球尺度的大气、陆地和海洋相关数据。ERA5 将许多历史观测资料(如气象站、高空探测、雷达和卫星数据)结合到一个先进的数据同化和建模系统中,并包含了多种自然因子数据集[10]。本研究使用的蒸发(ET)数据获取自 ERA5,且其时空尺度已与 GRACE 和 GLDAS 数据进行了统一。

2.3. 水文模型与水量平衡法

为了从 GRACE 观测到的总质量变化(ΔTWS)中分离出地下水储量变化(ΔGWS),或者独立估算 GWS,本研究涉及了多源水文模型(如 GLDAS, VIC, Noah)。

2.3.1. GRACE-DS (Disaggregation)方法

本研究采用 GRACE 卫星的原始观测任务数据(Level-3 Mascon)。鉴于研究周期的设定及数据的一致性要求,2017 年至 2018 年间的观测空缺期未纳入本次计算范围。这是基于 GRACE 估算 GWS 的标准方法:

$$\Delta GWS_{GRACE} = \Delta TWS_{GRACE} - \Delta SMS_{Model} - \Delta SWS_{Model} - \Delta SWE_{Model} \quad (1)$$

其中, ΔSMS (土壤水)、 ΔSWS (地表水)、 ΔSWE (雪水)通常来自于 GLDAS (NOAH/VIC/CLM)或 WGHM 模型[12]。

2.3.2. 独立水量平衡法(WB)

本研究中提到的“水量平衡法”通常指基于通量的估算方法,其公式为[13]:

$$\Delta GWS_{WB} = (P - ET - R) - \Delta SMS - \Delta SWS \quad (2)$$

该方法极度依赖于通量项的精度,且通常难以捕捉深层地下水的人为开采信号,这是导致其与 GRACE 结果差异的关键原因。

2.4. Prophet 时间序列模型

Prophet 是一种基于加性模型的时间序列预测工具,特别适用于具有强烈季节性特征的数据。模型构成:

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \epsilon_t \quad (3)$$

其中, $g(t)$ 是趋势项, $s(t)$ 是季节项。模型通过监测趋势项斜率的显著变化来识别“变异点”。在本研究中,Prophet 被用于识别 GWS 时间序列中趋势发生根本性逆转的确切时刻[14]。

3. 结果分析: GWS 与 TWS 的时空演变

3.1. 枯竭期(2002~2014): 长期亏损的基线

如图 1,从 2002 年 GRACE 卫星发射至 2014 年南水北调中线通水前,华北平原的 GWS 呈现出高度线性下降趋势。该时期内,华北平原整体 GWS 亏损速率约为-60 至-80 亿立方米/年(或-15 至-20 mm/yr EWH)。这一结果与 Cai 等人在河南区域的研究一致,其发现 2003~2014 年间地下水干旱指数(GWI)年均下降 5.8% [15]。TWS 的下降主要由 GWS 的亏损主导,土壤水(SMS)的变化虽然有季节性波动,但在年代际尺度上相对稳定。为了直观展现这一时期亏损的空间演变过程,图 2 绘制了 2005 年、2010 年与 2014 年的 GWSA 空间分布图。可以清晰地观察到,亏损中心高度集中在太行山前的京津冀平原区(见图 2 中深红色的负异常区域,主要覆盖石家庄、保

定、邢台一带)。这些地区是冬小麦-夏玉米轮作的核心区,农业灌溉强度大。随着时间推移,深红色严重亏损区从2005年的山前局部聚集,到2010年迅速向东扩展连片,并在2014年达到了空间范围与亏损强度的峰值。相比之下,东部沿海地区(山东、河北东部)由于土壤盐碱化限制了部分农业开采,其储量异常变化较为平缓(图2中浅色或略偏蓝区域),亏损速率相对较低[5]。

3.2. 过渡期(2015~2019): 减缓与分化

2014年底南水北调中线一期工程通水后,华北平原进入了水文响应的过渡期。从图1可以看出,自2015年开始,GWS的下降斜率开始变缓,这在北京及河北北部地区尤为明显,区域差异开始显现。如图3的GWSA变化趋势空间分布所示,北部(京津冀)受益于江水置换,亏损显著收窄(表现为图3中的浅色及零星正值区域);而南部(河南、山东)虽然也受水,但由于农业比重更大且降水波动,仍表现为震荡或缓慢下降(表现为图3中的深红色高亏损集中区)。

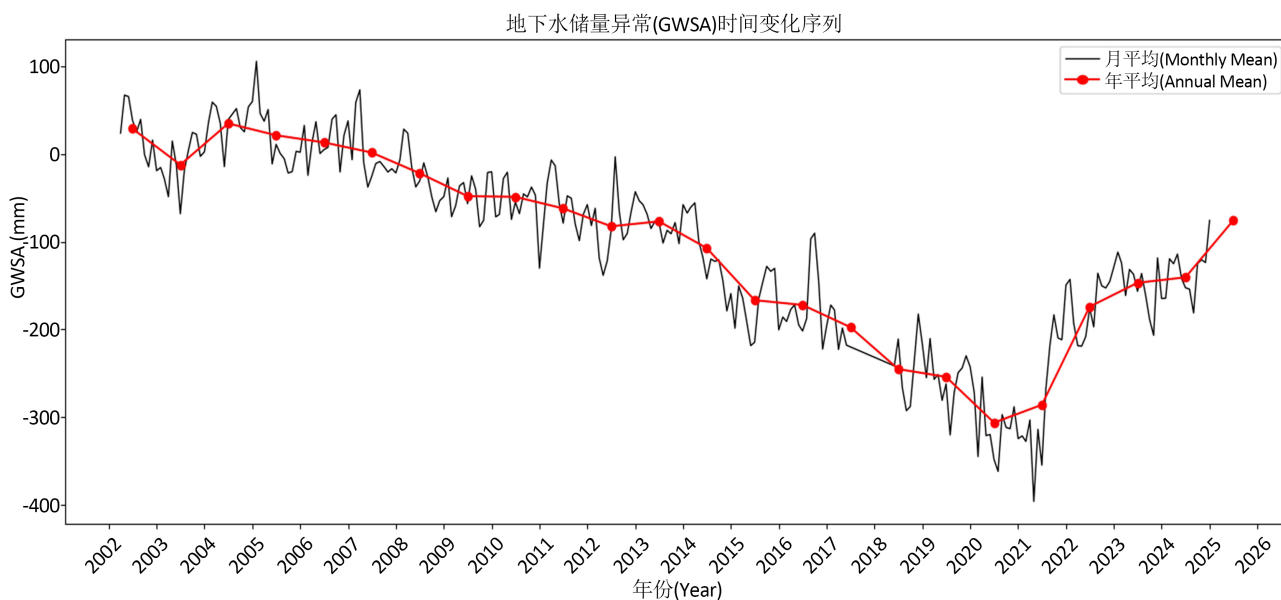


图1. 华北平原月均GWS时间序列

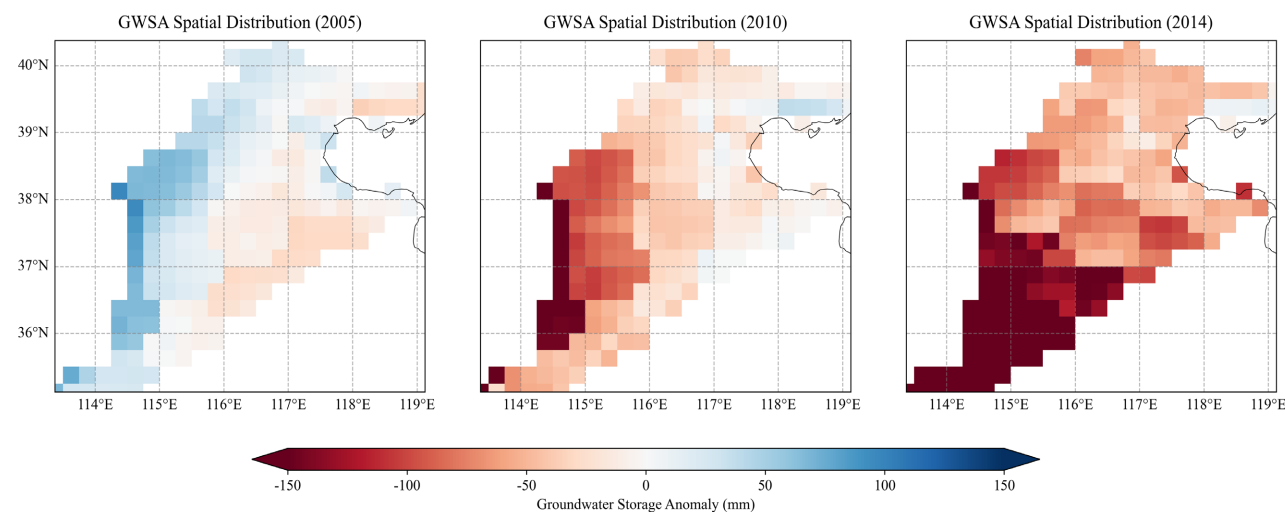


图2. 华北平原2005、2010及2014年地下水储量异常(GWSA)空间演变特征

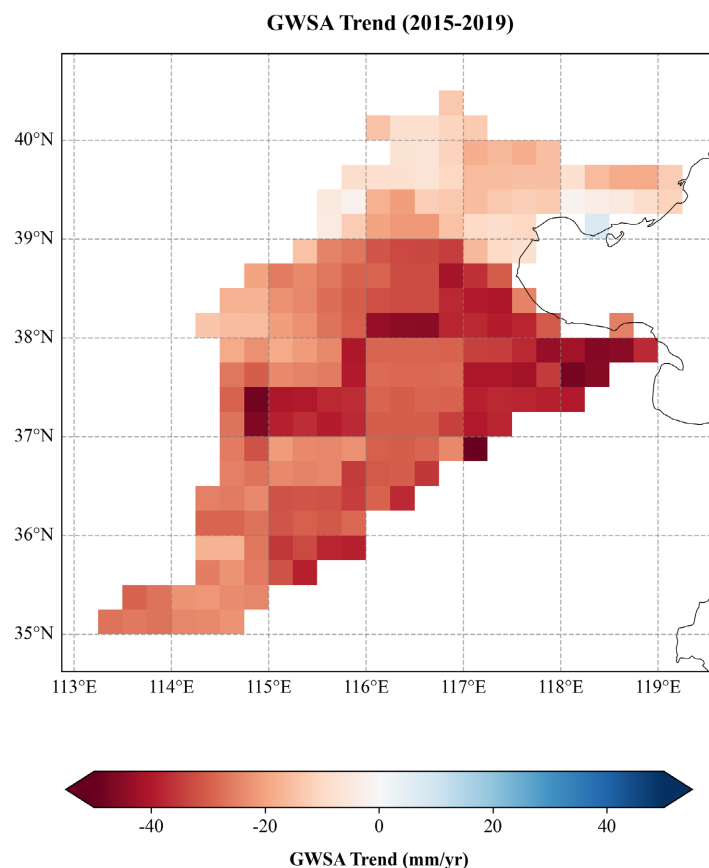


图 3. 华北平原 GWSA 变化趋势空间分布

3.3. 恢复期(2020~2024): 历史性的转折

本研究结合长序列的 GRACE Mascon 数据与水量平衡计算, 印证并量化了 1.2 节中提出的地下水演变, 证实了华北平原 GWS 自 2020 年起确实发生了历史性的结构性逆转。如图 1 所示, 在此期间区域 GWS 彻底终结了此前的“慢性失血”状态, 由长期的持续负增长态势正式转为强劲的正增长。如图 4 所示, 在 2020 至 2024 年的恢复期内, 华北平原地下水平均回升速率达到了约 0.7 m/yr (等效水高)。这一显著的储量跃升, 使得该区域浅层地下水位在 2024 年已回升至接近 2005 年的历史水平。这一定量结果不仅确证了 2020 年作为区域水文演化分水岭的科学合理性, 也直观反映了外部干预与气候增益叠加下含水层系统的巨大弹性恢复能力[16]。

3.4. Prophet 模型识别的变异点关联分析

Prophet 模型在图 4 中识别出的变异点精确锁定在 2020 年 8 月, 在图 5 中识别出的变异点精确锁定在 2020 年 2 月。这一统计学上的断点与实际的水文及政策事件具有高度的关联性。

2019 年是《华北地区地下水超采综合治理行动方案》全面铺开的关键年份。该方案在 2019 年实施了大规模的河道生态补水试点(如滹沱河、滏阳河)。这些地表水在 2019 年下半年至 2020 年初逐渐渗入到达潜水含水层, 水位在 2020 年初出现响应。通常 2~5 月是华北平原冬小麦春灌的高峰期, 也是地下水位下降最快的季节。2020 年春季, 由于大规模的休耕政策以及新冠疫情期间部分工业用水的减少, 叠加南水北调的置换效应, 传统的春季水位“深跌”并未出现, 这在时间序列上表现为一个强烈的趋势转折信号。虽然 2021 年的暴雨是加速器, 但 2020 年 8 月的转折点表明, 在极端降水发生之前, 人为干预已经成功扭转了地下水的长期亏损趋势。这一点至关重要, 它证明了恢复并非纯粹由气候驱动。

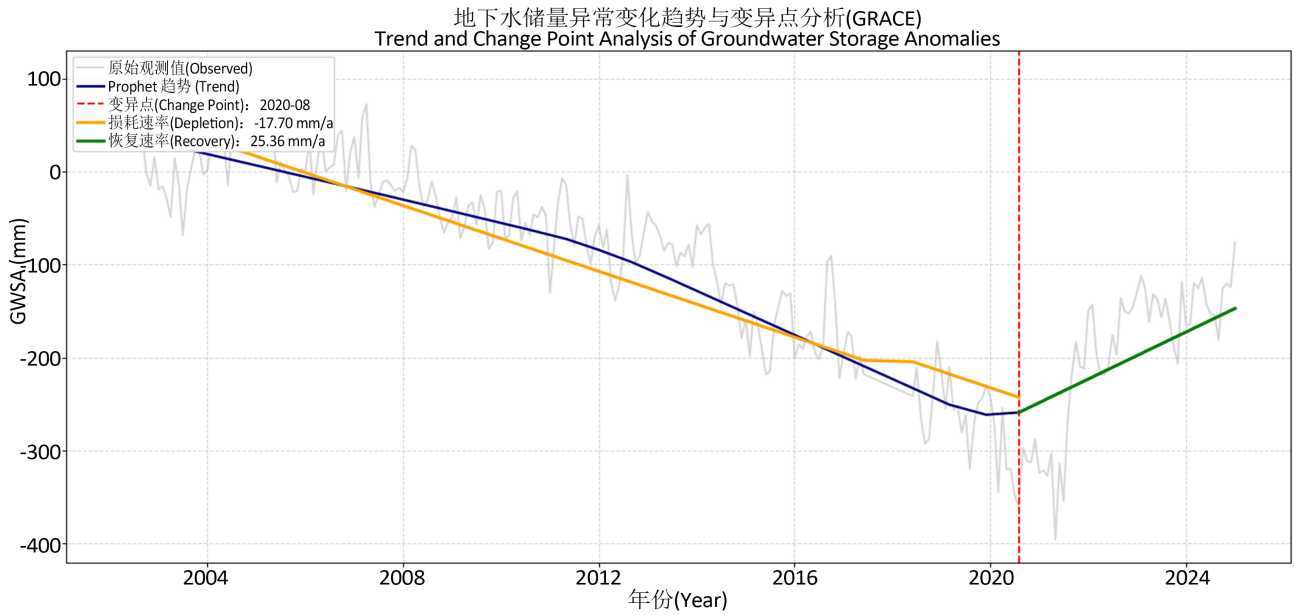


图 4. 华北平原月均 GWS 时间序列 Prophet 识别(GRACE)

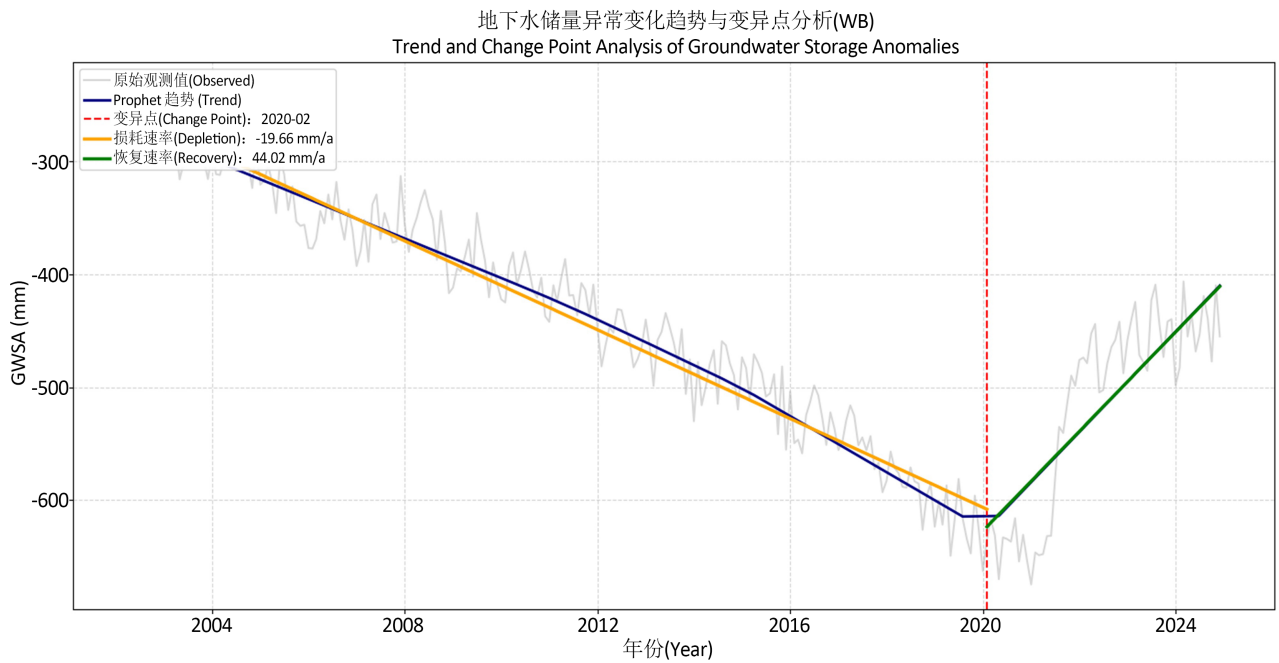


图 5. 华北平原月均 GWS 时间序列 Prophet 识别(WB)

3.5. 多源数据反演结果的显著差异体现

对比基于 GRACE 卫星观测(图 4)与独立水量平衡法(WB) (图 5)的时间序列 Prophet 识别结果, 可以发现两者在刻画地下水储量异常(GWSA)恢复特征时存在显著的数值差异。具体而言, GRACE 数据识别出的变异点为 2020 年 8 月, 其计算的恢复速率为 25.36 mm/a。然而, WB 法不仅将变异点提前至 2020 年 2 月, 且估算的转折后恢复速率高达 44.02 mm/a, 几乎是 GRACE 观测值的两倍。这种在转折时间上的超前以及在恢复速率上的显著高估, 需要进一步探讨不同物理模型在华北平原这种强人类活动干扰区的适用性边界。

4. 驱动机制讨论

造成 2020 年转折点及随后强劲恢复的原因是多维度的，是气候、工程与政策的叠加效应。

4.1. 南水北调工程(SNWD)的基石作用

南水北调中线工程是地下水恢复的物质基础，其贡献主要体现在两个方面[17]：南水北调工程将长江水输送至京津冀豫四省市，主要用于置换城市工业和生活用的地下水水源。截至 2023 年，中线工程累计调水超过 600 亿立方米。在受水区，深层承压水的开采量大幅下降(2005~2023 年间减少了约 120 亿立方米/年的开采量)。这种“开源”直接导致了“节流”，使得深层水位得以在压力恢复下迅速回升。除此之外，工程还将大量盈余水量用于河湖生态补水。自 2018 年起，向滹沱河、滏阳河、南拒马河等常年干涸的河道进行常态化补水。这些地表水体通过河床渗漏直接补给浅层地下水。监测数据显示，补水河道周边的浅层地下水位回升速率显著高于非补水区。

4.2. 极端降水事件的催化作用，以 2021 年为例

虽然 2020 年初趋势已经反转，但 2021 年的极端降水事件(特别是河南“7·20”特大暴雨)极大地加速了这一进程。在 2021 年夏季，河南及华北南部遭遇了历史罕见的强降雨。Cai 等人的研究指出，该事件后河南地区的地下水干旱指数(GWI)较上一年跃升了 50% [15]。暴雨不仅通过由于土壤饱和产生的直接入渗补给地下水，更重要的是产生了大量的地表径流，这些径流滞留在河道、坑塘和蓄滞洪区中，形成了长历时的集中入渗补给。降水对地下水的补给通常存在滞后。GRACE TWS 数据通常能迅速捕捉到降水带来的总质量增加(主要是地表水和土壤水)，但实测井水位(特别是深层)的响应则滞后数月至一年。2021 年的降水盈余在随后的 2022 年继续转化为地下水储量的增加，即便 2022 年降水相对偏少，地下水位依然保持了上升态势，证明了极端降水对含水层具有长效的“充注”效应[18]。

4.3. 农业用水政策调整的结构贡献

华北平原 70%的用水来自农业，因此农业节水是扭转亏损的关键变量。自 2014 年起，国家在河北等地实施了季节性休耕制度(一季休耕、一季雨养)。特别是减少冬小麦的种植面积，因为冬小麦的生长关键期(春季)与降水亏缺期重合，极其依赖地下水灌溉。通过推广抗旱品种和休耕，直接削减了春季的地下水开采峰值[15]；推广喷灌、滴灌等高效节水技术，以及实施农业水价综合改革，有效降低了单亩灌溉用水量；根据随机森林归因分析，在某些子区域(如黄河上游及华北平原部分地区)，植被指数(NDVI)的变化(反映作物种植结构)对 GWS 变化的贡献度甚至超过了降水[15]。这表明，通过人为调整种植结构(降低高耗水作物比例)，有效地遏制了蒸散发(ET)对地下水的过度消耗[19]。

5. 方法论差异探讨：为何水量平衡法(WB)结果存在显著差异

如本文 3.5 节对比所示，WB 方法在捕捉 2020 年后的 GWS 恢复趋势时，其估算的恢复速率(44.02 mm/a)显著高于 GRACE 实际观测值(25.36 mm/a)，且转折时间点存在数月的超前偏差。这种差异并非偶然的数据波动，而是由两种方法在物理机制刻画和输入项设定上的本质区别造成的。造成 WB 法在华北平原出现显著高估与偏差的原因，主要归结于以下几点：

5.1. 蒸散发(ET)产品的极度不确定性

水量平衡法是一个残差法，所有输入项的误差都会累积到最终的 GWS 估算中。其中，ET 是最大的支出项，也是最难准确观测的项。WB 法通常依赖 GLDAS、GLEAM 或 MODIS 等模型的 ET 产品。这些模型往往基于特定的植被参数和气象强迫数据估算 ET。在华北平原，由于双季种植制度(冬小麦 - 夏玉米)导致实际 ET 远高于

自然植被 ET [20]。如果模型低估了实际 ET (例如未能充分捕捉灌溉导致的额外蒸散发), WB 法计算出的 ΔGWS 就会虚高(表现为储量增加或亏损较少),从而直接导致了图 5 中 44.02 mm/a 这一异常偏高的恢复速率估算结果。

5.2. 忽略了域外调水的输入项

标准的水量平衡公式 $\Delta GWS = P - ET - R$ 假设封闭流域,降水是唯一的输入。在华北平原,南水北调每年输入数十亿立方米的水量。这部分水并未包含在自然降水 P 中,但在实际物理过程中,它替代了地下水开采或直接回补了地下水。如果 WB 计算不显式地加入“调水输入”项,就会低估系统的总输入,这也是导致其估算的 GWS 动态与包含全要素的 GRACE 观测产生偏离的重要原因。

5.3. 尺度与物理意义的错位

GRACE 观测的是重力场变化,反映的是所有形式的水质量总和。它不仅包含浅层土壤水,还包含深层承压水和地表水库蓄水。WB 法中的径流(R)和土壤水(ASMS)通常由陆面模式模拟,这些模式往往对深层地下水动力学描述不足。因此, WB 法往往难以捕捉到深层承压含水层因压采而产生的弹性储量恢复,导致其结果与包含全剖面信息的 GRACE 数据不一致[5]。

6. 结论

综合利用重力卫星、水文模型及地面监测数据的分析表明,华北平原地下水储量演变已在 2020 年发生了历史性的根本转折。Prophet 模型识别的“2020-08”变异点,精确标记了该区域从长达数十年的“地下水赤字时代”跨入“综合治理恢复时代”的分水岭。

2020 年是华北平原地下水由亏转盈的关键转折点。此后区域 GWS 以约 0.7 米/年的速度回升,至 2024 年已部分恢复至 2005 年水平。这一恢复并非单纯的气候波动结果,而是“工程 + 政策 + 气候”的综合产物。南水北调中线工程通过水源置换和生态补水提供了恢复的物质基础(贡献了结构性逆转);严格的地下水压采和农业节水政策遏制了无序消耗;而 2021 年的极端降水事件则作为强效催化剂,大幅加速了浅层含水层的充注。

水量平衡法(WB)在评估此类强人工干预区域时存在局限性,主要源于其对跨流域调水输入的忽略及蒸散发估算的不确定性。GRACE 卫星与密集监测井网的结合,提供了更为真实可靠的储量变化图景。

尽管当前恢复势头良好,但华北平原地下水系统的恢复仍处于初级阶段,且高度依赖于外部输水和降水红利。维持这一恢复趋势,仍需坚持当前的压采政策,并警惕极端干旱年份可能带来的波动风险。

参考文献

- [1] FENG, W., ZHONG, M., LEMOINE, J. M., BIANCALE, R., HSU, H. T. and XIA, J. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2110-2118. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20192>
- [2] ZHANG, Y., ZHANG, R., MA, M. and BU, Q. Identifying groundwater droughts and its recovery based on long-term groundwater storage simulation in catchments across Poyang Lake basin. *Hydrological Processes*, 2025, 39(8): e70248. <https://doi.org/10.1002/hyp.70248>
- [3] 郭海朋, 白晋华, 巨袁臻, 等. 华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 162-171.
- [4] 费宇红, 张兆吉, 等. 华北平原地下水开采引起的生态环境地质问题演变与现状[J]. *地球学报*, 2015, 36(6): 710-717.
- [5] LONG, D., YANG, W., SCANLON, B. R., et al. South-to-North Water Diversion stabilizing Beijing's groundwater levels. *Nature Communications*, 2020, 11: 3665. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17428-6>
- [6] ROWLANDS, D. D., LUTHCKE, S. B., MCCARTHY, J. J., KLOSKO, S. M., CHINN, D. S., LEMOINE, F. G., BOY, J. P. and SABAKA, T. J. Global mass flux solutions from GRACE: A comparison of parameter estimation strategies—Mass concentrations versus stokes coefficients. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(1): 01403. <https://doi.org/10.1029/2009jb006546>

- [7] WIESE, D. N., LANDERER, F. W. and WATKINS, M. M. Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 7490-7502. <https://doi.org/10.1002/2016wr019344>
- [8] RODELL, M., HOUSER, P. R., JAMBOR, U., GOTTSCHALCK, J., MITCHELL, K., MENG, C. J., et al. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394. <https://doi.org/10.1175/bams-85-3-381>
- [9] WANG, F., LAI, H., LI, Y., FENG, K., TIAN, Q., GUO, W., QU, Y. and YANG, H. Spatio-temporal evolution and teleconnection factor analysis of groundwater drought based on the GRACE mascon model in the Yellow River Basin. *Journal of Hydrology* 2023, 626(1): 130349. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130349>
- [10] SHARAFATI, A., ASADOLLAH, S. B. H. S. and NESHAT, A. A new artificial intelligence strategy for predicting the groundwater level over the Rafsanjan aquifer in Iran. *Journal of Hydrology*, 2020, 591(1): 125468. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125468>
- [11] GEMITZI, A., KOUTSIAS, N. and LAKSHMI, V. A spatial downscaling methodology for GRACE total water storage anomalies using GPM IMERG precipitation estimates. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5149. <https://doi.org/10.3390/rs13245149>
- [12] RODELL, M., VELICOGNA, I. and FAMIGLIETTI, J. S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 2009, 460(7258): 999-1002. <https://doi.org/10.1038/nature08238>
- [13] HOFFMANN, L., GUNTHER, G., LI, D., STEIN, O., WU, X., Griessbach, S., et al. From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(5): 3097-3124. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>
- [14] TAYLOR, S. J. and LETHAM, B. Forecasting at scale. *The American Statistician*, 2018, 72(1): 37-45. <https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080>
- [15] CAI, P., LI, R., GUO, J., et al. Spatiotemporal dynamics of groundwater in Henan Province, Central China and their driving factors. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112372. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112372>
- [16] ALAM, S., GEBREMICHAEL, M., BAN, Z., SCANLON, B. R., SENAY, G. and LETTENMAIER, D. P. Post-drought groundwater storage recovery in California's Central Valley. *Water Resources Research*, 2021, 57: e2021WR030352. <https://doi.org/10.1029/2021wr030352>
- [17] TI, J., YANG, Y., PU, L., et al. Ecological compensation for winter wheat fallow and impact assessment of winter fallow on water sustainability and food security on the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328: 129431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129431>
- [18] ZHANG, R., PENG, Y., CHAO, N., et al. A rapid increase of groundwater in 2021 over the North China Plain from GPS and GRACE observations. *GPS Solutions*, 2025, 29(1): Article Number 37. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01794-5>
- [19] JU, X. L., GAO, Z. Q. and LI, W. W. Unveiling evolutionary patterns, differentiation mechanisms, and driving pathways of groundwater storage anomalies in China's Yellow River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, 61: 102655. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102655>
- [20] WANG, Y., GU, X., YANG, G., et al. Impacts of climate change and human activities on water resources in the Ebinur Lake Basin, Northwest China. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(6): 581-598. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0067-4>