基于机器学习的河南省平原区浅层地下水位变化及归因分析

张娟娟[1,2,3]，湛江[4]，张婕[4]

(1.河南省地质局生态环境地质服务中心，河南 郑州 450053; 2.河南省矿山环境生态修复工程技术研究中心，河南 郑州 450053; 3.河南省地热能开发工程技术研究中心，河南 郑州 450053; 4. 黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450003)

摘 要: 【**目的**】揭示河南省平原区浅层地下水位的时空演变特征与驱动机制，为区域地下水资源可持续管理与超采治理提供依据。【**方法**】基于2005—2022年浅层地下水位及气温、降水量、NDVI、浅层地下水供水量等多源驱动因子数据，采用Sen-MK趋势检验、STL时间序列分解和XGBoost-SHAP模型等方法，系统分析浅层地下水位的长期时空演变、年内季节波动特征及驱动机制。【**结果**】①河南省平原区浅层地下水位整体呈微弱下降趋势，表现为2005—2009年相对平稳、2010—2015年高位剧烈波动、2016—2019年快速下降、2020—2022年低位趋稳的四阶段特征。②地下水位在空间上表现为，以平原核心区下降为主，边缘区域零星上升。③地下水位年内呈稳定的12个月周期性波动，补给-排泄节律稳定。④不同阶段地下水位波动的主控因子差异明显。2005年地下水供水量、降水和蒸发共同主导，2013年降水和NDVI贡献增强，2017年地下水供水量贡献最高，2022年地下水供水量仍居首位，NDVI作用增强。【**结论**】河南省平原区浅层地下水位的演变具有显著的阶段性和空间异质性，其驱动机制依次表现为“人类活动-气候”型、“气候-生态”型，“人类活动主导”型和“人类活动-生态”型。研究结果可为区域地下水资源调控及超采治理提供参考。

关键词: 浅层地下水位；时空演变；驱动机制；STL时间序列；XGBoost-SHAP；河南省平原区

中图分类号: P335 **文献标识码**:A

浅层地下水是华北平原工农业生产、生态环境维持及居民生活用水的核心保障，其水位动态直接反映区域水资源供需平衡与生态环境状况，也是气候变化与人类活动干扰的敏感指示器[1-2]。华北平原人口密集，地下水超采问题长期突出，水位下降引发的一系列生态环境问题已成为制约区域可持续发展的关键瓶颈[3]。河南省平原区位于华北平原南缘，地处中国南北气候过渡带，区内农业灌溉发达，浅层地下水既是重要灌溉水源，也是维系区域生态平衡的关键要素[4]。因此，阐明浅层地下水位的动态演变规律及其驱动机制，是准确研判地下水资源变化趋势、科学制定开发利用与保护措施的重要前提。

目前，国内外学者已针对平原区地下水位变化开展了大量研究，形成了较为成熟的研究方法与技术体系。在时空演变特征分析方面，以往研究多采用线性回归、滑动平均或常规趋势检验等统计学方法，刻画区域地下水位的长期演变态势[5]。近年来，Theil-Sen Median趋势分析与Mann-Kendall显著性检验因其能够有效规避异常值干扰，被广泛应用于水文、植被覆盖等时序数据的趋势量化与显著性判断[6-7]。

在驱动因素识别方面，传统研究多依赖皮尔逊相关分析、多元线性回归或主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）等方法，评估降水、气温或地下水开采等单一变量对水位的独立贡献[8]。但上述方法难以刻画驱动因子与地下水位变化之间的非线性关系。随机森林、支持向量机和

收稿日期/Received:2026-05-11 **修回日期**/Revised:2026-08-31

基金项目:国家自然科学基金黄河水科学联合基金项目（U2443204）；2023年度河南省科技攻关项目（232102320247）。

第一作者:张娟娟（1981—），女，高级工程师，硕士，从事水工环地质方面的研究。E-mail:Zhjj0822@163.com。

通信作者:湛江（1992—），男，高级工程师，博士，从事地下水科学与工程方面的研究。E-mail:zj20181021@163.com。

XGBoost 等机器学习模型能够拟合复杂的非线性响应，与 SHAP 解释框架结合后可量化驱动因子的贡献强度与作用方向，有效破解了机器学习“黑箱”难题，已在多个国家和地区的地下水归因分析中得到应用[9-15]。

但现有研究仍存在两点局限：其一，多将驱动因子视为整个研究期内的静态变量，忽略了驱动机制本身可能发生的阶段性演变；其二，多侧重单一因子的独立贡献量化，对气候、生态与人类活动之间的非线性交互与协同调控机制解析不足。针对上述问题，本文在 STL（Seasonal-Trend decomposition using LOESS，STL）时序分解和 XGBoost-SHAP 因子分析的基础上，选取典型年份，利用 SHAP 值及交互依赖关系刻画驱动因子贡献强度、作用方向及其随时间变化的路径，在“阶段性识别”和“多因子交互解析”两方面对既有研究形成补充。

河南省平原区地处南北气候过渡带，浅层地下水位波动受到极端气候、强烈农业活动与南水北调工程的叠加影响，其驱动机制与华北平原其他地区具有不同之处。与海河平原长期超采区相比，河南省平原区浅层地下水对降水入渗、作物需水、蒸散发及土地利用变化更敏感；与淮北平原相比，又受黄河补给、南水北调受水区和高强度农业开发的叠加影响，具有气候-农业-工程复合扰动特征。因此，河南省平原区是研究多因子耦合驱动浅层地下水演变的理想“天然试验场”。

基于此，本文以河南省平原区为研究区，以 2005—2022 年浅层地下水位为研究变量，结合气温、降水量、植被覆盖指数等多源驱动因子数据，采用 Sen-MK 趋势检验、STL 分解和 XGBoost-SHAP 模型等方法，分析地下水位的时空演变与季节波动，识别关键驱动因子及其阶段性交互效应，为区域地下水调控提供参考。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

河南省平原区（北纬 31°48′~36°17′、东经 112°25′~116°38′）地处华北平原南部、河南省中东部，西起伏牛山东麓，东至豫皖省界，北抵黄河故道与太行山前，南达淮河干流北岸，面积约 9.2 万 km^2，研究区位置如图 1 所示。该区属暖温带大陆性季风气候，年均降水量为 500～900 mm，时空分布极不均衡；多年平均水资源总量约 389.2 亿 m^3，人均、亩均水资源量仅为全国平均水平的 1/5 和 1/6，属严重缺水区，浅层地下水是城乡生活、工业生产和农业灌溉的重要水源。

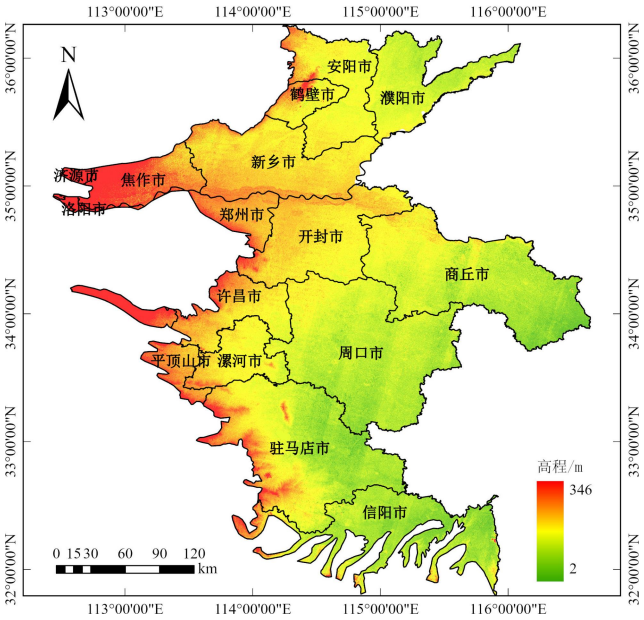


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据类型与来源

本文数据涵盖 2005—2022 年浅层地下水位及各类驱动因子，均为月尺度数据（共 216 组），并完成空间分辨率统一和缺失值处理，具体见表 1。

表 1 多源数据信息

Tab. 1 Multi-source data information

数据类型	具体指标	数据来源	用途
核心目标数据	浅层地下水位	国家青藏高原科学数据中心（https://www.tpdc.ac.cn/）	作为模型因变量，支撑浅层地下水位的时空演变分析及驱动机制研究
气候驱动因子数据	气温、降水量、蒸发量	生态气象云服务平台（https://em.cams.cma.cn/），分辨率 1 km×1 km	量化气候因素对地下水位的驱动作用及交互效应

数据类型	具体指标	数据来源	用途
生态驱动因子数据	归一化差异植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）	生态气象云服务平台（https://em.cams.cma.cn/），分辨率 1 km×1 km	探究植被覆盖对地下水位的调控作用及生态水文效应
人类活动驱动因子数据	浅层地下水供水量	河南省水资源公报，各地级市供水量	表征人类活动对地下水位影响的最直观因素
	农业灌溉强度	生态气象云服务平台（https://em.cams.cma.cn/），分辨率 1 km×1 km	分析农业生产活动对地下水位的影响强度
	人口密度	橡树岭国家实验室 LandScan 数据集，原始分辨率 1 km×1 km	表征人口集聚的人类活动强度，量化其对地下水位的作用
	土地利用类型	武汉大学杨杰与黄昕教授团队研制的1985—2025 年长时序土地覆盖数据集（基于 Landsat 影像，原始分辨率 30 m），采用最邻近法重采样至 1 km×1 km	反映下垫面土地利用格局，分析其对地下水补给与消耗的影响

2 研究方法

2.1 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验

Theil-Sen Median 趋势分析是基于非参数统计的趋势量化方法[16-17]，通过计算时间序列中所有成对数据点的斜率中位数，估计长期变化速率，对异常值和数据分布具有较强适应性，公式为：

$$\beta=\text{median}(\frac{y_j-y_i}{j-i})...(j>i) \quad (1)$$

式中：β为 Sen 趋势斜率，y_i、y_j 分别为第 i、j 时刻的地下水位标高；$\beta>0$、$\beta<0$ 和$\beta=0$ 分别表示水位上升、下降和无明显趋势。

结合 Mann-Kendall 显著性检验判断趋势统计可靠性，通过检验统计量 Z 评估序列趋势显著性：$Z>2.58$ 为极显著增加，$1.96<Z\leq2.58$ 为显著增加，$0<Z\leq1.96$ 为微显著增加；$Z=0$ 为无显著变化；$-1.96\leq Z<0$ 为微显著减少，$-2.58\leq Z<-1.96$ 为显著减少，$Z<-2.58$ 为极显著减少。

2.2 STL 分解与季节幅度测算

在明确长期趋势的基础上，采用 STL 分解剥离趋势成分，聚焦短期波动特征[18-19]。该方法基于局部加权回归散点平滑法，将地下水位时间序列 y_t 分解为趋势成分 T_t、季节成分 S_t 和残差成分 R_t，分解关系为：

$$y_t=T_t+S_t+R_t(t=1,2,\ldots,n) \quad (2)$$

式中：y_t 为 t 时刻的地下水位；T_t 为趋势成分；S_t 为季节成分；R_t 为残差成分；n 为时间序列长度。

季节幅度测算以 STL 分解得到的季节成分 S_t 为基础，按年度拆分季节序列，通过计算每年内季节成分的最大值与最小值之差，量化地下水位的季节波动强度，进而分析其年内变化的时空差异规律，计算公式为：

$$A_y=\max(S_{y,1},S_{y,2},\ldots,S_{y,12})-\min(S_{y,1},S_{y,2},\ldots,S_{y,12}) \quad (3)$$

式中：A_y 为第 y 年的季节波动幅度（y=2005,2006,...,2022）；$S_{y,m}$ 为第 y 年第 m 月的季节成分值（m=1,2,...,12）。

A_y 越大，该年度地下水位的季节波动越显著。

2.3 XGBoost-SHAP 模型与精度评价

2.3.1 XGBoost 模型构建与变量选取

以 2005—2022 年河南省平原区各网格单元浅层地下水位标高为因变量，选取降水、气温、蒸发量、浅层地下水供水量、人口密度、植被覆盖指数、农业灌溉强度和土地利用类型（耕地占比、建设用地占比、林草地占比和水域湿地占比）共 8 类核心驱动因子，共计 11 个模型自变量，构建 XGBoost 回归模型。模型基于梯度提升迭代框架优化目标函数，通过正则化惩罚项控制模型复杂度，抑制过拟合；同时采用优化的树结构分裂策略，提升对高维、非线性驱动关系的拟合精度与计算效率，从而刻画驱动因子与地下水位变化之间的复杂非线性响应。模型目标函数计算公式为：

$$\hat{y}_i=F(x_i)=\sum_{k=1}^{K}f_k(x_i) \quad (4)$$

式中：$\hat{y}_i$ 为第 i 个网格单元浅层地下水位标高的

预测值；$x_i=(x_1,x_2,...,x_{11})$为第 i 个网格单元的 11 个驱动因子特征向量；K 为 XGBoost 模型中决策树的数量；$f_k(x_i)$为第 k 棵决策树对第 i 个样本的预测输出。模型超参数设定如下：学习率 0.1，树最大深度 6，最大迭代次数 1000，最小样本分裂数 20；采用未参与建模的 30%样本验证模型精度，以保证模型稳定性与泛化能力。

2.3.2 SHAP 解释框架原理

SHAP 框架基于博弈论中的沙普利值（Shapley Value）原理，将模型预测分解为基准值与各因子贡献之和，用于解释因子效应及交互关系，计算公式为：

$$\mathrm{SHAP}_i(x_i)=\varphi_0+\sum_{k=1}^{K} f_k(x_i) \qquad (5)$$

式中：$\mathrm{SHAP}_i(x_i)$为第 i 个样本的 SHAP 总贡献值；φ_0 为所有样本的平均预测值；M=11 为驱动因子数量；$\varphi_{i,j}$ 为第 j 个驱动因子对第 i 个样本的 SHAP 值，其绝对值大小反映该因子对地下水位变化的影响强度，正负号表示影响方向（正值为促进作用，负值为抑制作用）。

SHAP 交互效应表征两个因子联合贡献中不能由各自主效应简单叠加解释的部分，用于刻画驱动因子在模型预测中的相互依赖关系。

2.3.3 多元线性回归对照与精度评价

为验证 XGBoost 机器学习模型在处理非线性关系上的优势，本文增设多元线性回归（Multiple Linear Regression，MLR）作为基准模型，采用与 XGBoost 相同的输入因子、70%训练样本和 30%验证样本，并统一以决定系数 R^2、均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）对比模型精度。

3 结果与分析

3.1 地下水位时空演变特征

3.1.1 年均地下水位时间分异特征

研究区年均浅层地下水位标高的年际变化与趋势拟合如图 2 所示。从时序波动来看，年均地下水位在 50～90 m 区间波动，可划分为 4 个阶段：2005—2009 年为相对平稳期，水位标高总体维持在 50～65 m，波动幅度较小；2010—2015 年为高位剧烈波动期，2010 年水位标高快速升至约 90 m，随后在高位区间明显波动；2016—2019 年为快速下降期，水位自 2015 年开始持续下降，至 2019 年已降至约 50 m；2020—2022 年为低位趋稳期，地下水位基本稳定在 50 m 左右。线性拟合结果表明，研究期内年均地下水位标高随年份呈微弱负相关关系，年均下降约 0.78 m，但较低的决定系数（R^2=0.0941）和皮尔逊相关系数（r=−0.30676）说明，线性趋势的解释力极弱，年均水位仅能反映大致年际变化，其长序列阶段性特征在 3.2 节进一步分析。

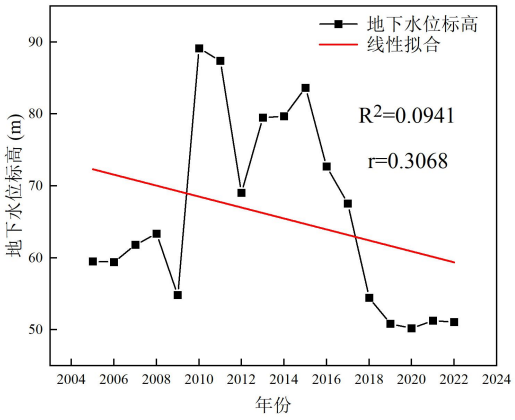


图 2 2005—2022 年年均水位标高年际变化与趋势拟合

Fig.2 Interannual variation and linear trend of annual mean shallow groundwater level elevation of 2005—2022

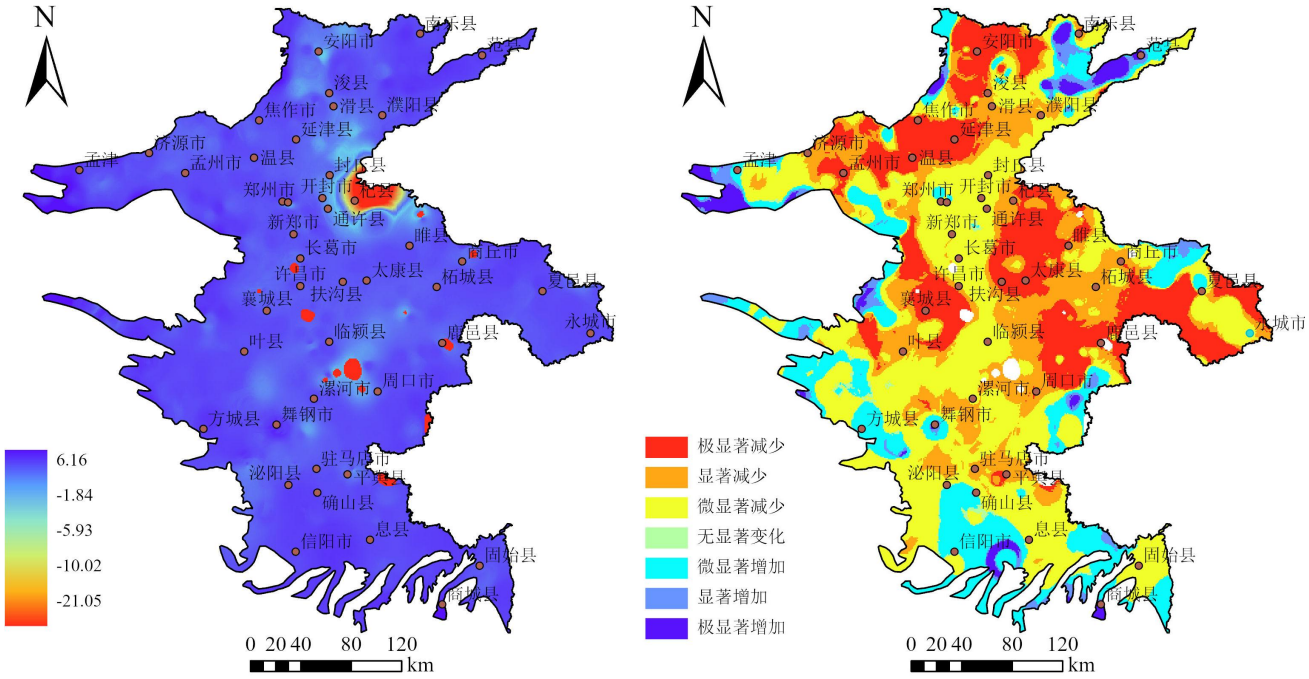
3.1.2 地下水位空间分异特征

图 3 反映了河南省平原区的 Sen-MK 检验结果。图 3（a）Theil-Sen Median 趋势空间分布表明，研究区地下水位以下降趋势为主导，面积达 72283 km²，占总面积的 78.51%；上升趋势区域面积为 8925 km²，占 20.56%；基本稳定区域仅 855 km²，占 0.93%。下降区广泛分布于平原区内部，水位抬升区主要分布于平原区边缘地带，并在局部零星出现。

图 3（b）Mann-Kendall 检验进一步揭示了地下水位标高变化趋势的统计显著性：①极显著下降区域面积占研究区总面积的 20.53%，主要分布于河南省平原区北部和中东部，北部集中于安阳—新乡—焦作—济源一带，中东部集中于许昌—开封—周口—商丘一带。②显著下降区域面积占比 20.37%，北部以滑县为核心，中部集中在叶县、漯河一带，南部集中在驻马店及平舆县一带，东部延伸至太康县、柘城县周边。③微显著下降区域面积占比 37.51%，分布范围较广，主要位于研究区中南部的郑州—许昌—漯河—驻马店一带，并零星分布于北部范县、东部永城市、南部息县和固始县等地。④无显著变化区域面积仅占 1.16%，零星分布于研究区各处。⑤上升趋势区

域中，极显著、显著和微显著上升区面积合计占比 20.44%，主要位于研究区边缘，包括范县、南乐、濮阳、孟津、商丘北部、周口南部及信阳、商城和固始北部。

Sen-MK 检验结果表明，河南省平原区地下水位变化具有显著空间异质性。



（a）Theil-Sen Median 趋势分区　　（b）Mann-Kendall 显著性检验空间分布

图 3　Theil-Sen Median 趋势分区与 Mann-Kendall 显著性检验空间分布

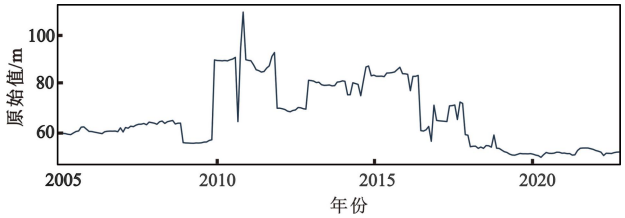
Fig.3　Spatial distribution of Theil-Sen trend partitioning and Mann-Kendall significance test

3.2　地下水位长序列和季节波动特征

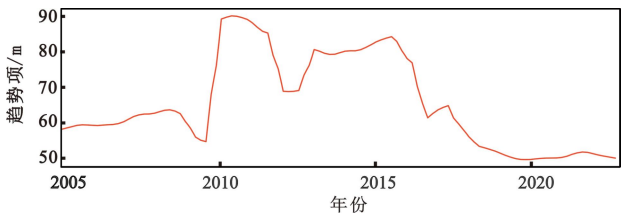
STL 分解结果如图 4 所示，2005—2022 年河南省平原区地下水位趋势项呈现明显的阶段性演变特征。2005—2009 年趋势项总体平稳，变化幅度较小；2010 年前后出现显著跃升，并在 2010—2015 年维持高位波动；2016 年以后趋势项由高位转入快速下降，是研究期内最突出的阶段性转折；2020—2022 年下降趋势明显减弱，并在较低水平小幅波动。可见，研究区地下水位并非简单的线性升降过程，而是表现出“前期平稳—中期跃升波动—后期快速下降—末期低位稳定”的阶段性特征，反映出气候波动、人类开采、供水结构调整及地下水治理措施的共同作用。

季节项分解结果表明，研究区地下水位具有稳定的 12 个月周期性波动，年内补给—排泄节律稳定。2005—2022 年季节项峰谷转换规律基本一致，振幅变化较小：丰水期降水和地表水补给增强，水位回升；枯水期降水减少、蒸散发和开采作用增强，水位下降。季节项的稳定性说明研究区地下水位的年内变化机制并未发生根本改变，长期趋势反映多年气候条件、人类活动和水资源调控的累积效应。

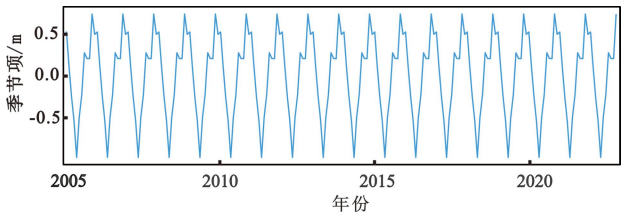
残差项多围绕零值小幅波动，但 2009—2011 年及 2016 年前后出现较大异常，提示存在趋势项和季节项难以解释的短期扰动，可能与极端气候、集中开采、工程调度或灌溉变化有关。



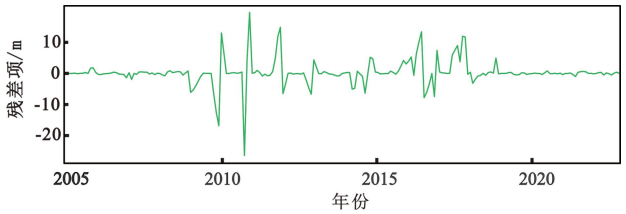
（a）原始值



（b）趋势项



（c）季节项



（d）残差项

图 4　STL 时间序列分解

Fig.4　STL time series decomposition

3.3　地下水位变化的驱动机制分析

为分析河南省平原区浅层地下水位变化的影响因素，以降水量、气温、蒸发量、浅层地下水供水量、人口密度、植被覆盖指数、农业灌溉强度、耕地占比、建设用地占比、林草地占比和水域湿地占比共计 11 个变量作为驱动因子，分别构建 XGBoost 模型和多元回归模型，模型精度对比见表 2。

表 2 典型年 XGBoost 和多元线性回归模型精度对比

Tab. 2　Comparison of model accuracy between XGBoost and MLR in typical years

典型年	精度指标	多元线性回归	XGBoost
2005	R^2	0.3223	0.9884
	RMSE	26.1919	3.4239
	MAE	10.1230	1.8411
2013	R^2	0.2492	0.9921
	RMSE	27.5686	2.8304
	MAE	12.3018	1.5757
2017	R^2	0.2275	0.9466
	RMSE	27.9639	7.3503
	MAE	12.4679	2.8930
2022	R^2	0.2622	0.9795
	RMSE	27.3282	2.1442
	MAE	11.8571	1.2785

本文以 30%测试集的精度指标作为评价指标，结果显示，XGBoost 在各典型年份的 R^2 均高于 0.94，且 R^2、RMSE 和 MAE 均明显优于 MLR，表明其对所选驱动因子与地下水位非线性关系的拟合效果较好。

3.3.1　驱动因子与驱动机制

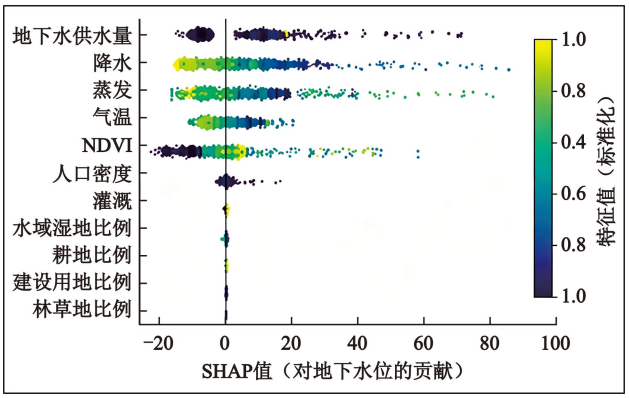
典型年份地下水位驱动因子 SHAP 值分布及贡献度如图 5 所示。2005 年、2013 年、2017 年、2022 年 4 个典型年份地下水位变化驱动因子的贡献强度及作用方向存在显著差异，选取 SHAP 贡献大于 20%的因子作为驱动机制因子，对 4 个典型年份做具体分析。

2005 年，地下水供水量是影响河南省平原区浅层地下水位的首要因子，贡献占比为 28.57%，说明地下水开发利用强度对地下水位格局具有显著影响。降水、蒸发、气温和 NDVI 的贡献占比分别为 22.20%、21.28%、13.71%和 13.22%，说明降水补给和蒸散消耗也是该时期的重要驱动因素。而人口密度、灌溉及土地利用因子贡献在各个年份均较低，影响可能更多通过地下水供水量、植被覆盖或下垫面条件间接体现。以上分析表明，2005—2009 年地下水位的驱动机制为“人类活动-气候”型。

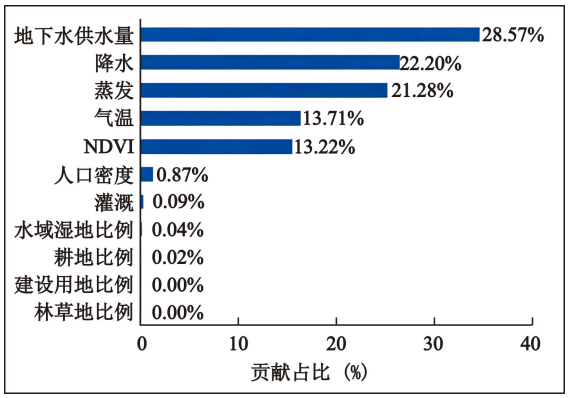
2013 年，降水是影响河南省平原区浅层地下水位的首要因子，贡献占比为 35.24%，说明降水补给条件对该时期地下水位格局具有最显著影响。NDVI 和蒸发的贡献占比分别为 23.71%和 18.42%，表明植被覆盖状况及蒸散消耗过程也具有重要作用。地下水供水量和气温的贡献占比分别为 12.26%和 9.40%，其影响相对有限。以上分析表明，2010—2015 年地下水位主要受降水补给和植被覆盖控制，即“气候-生态”驱动类型。

2017 年，地下水供水量是影响河南省平原区浅层地下水位的首要因子，贡献占比达 41.71%，说明地下水开发利用强度对该时期地下水位格局具有明显主导作用。蒸发、降水、NDVI 和气温的贡献占比分别为 18.55%、15.54%、12.35%和 10.21%，均小于 20%，表明蒸散消耗、降水补给、植被覆盖和区域热力条件仍是影响地下水位变化的重要自然因素，但作用相对有限。因此，2016—2019 年地下水位变化以人类活动主导。

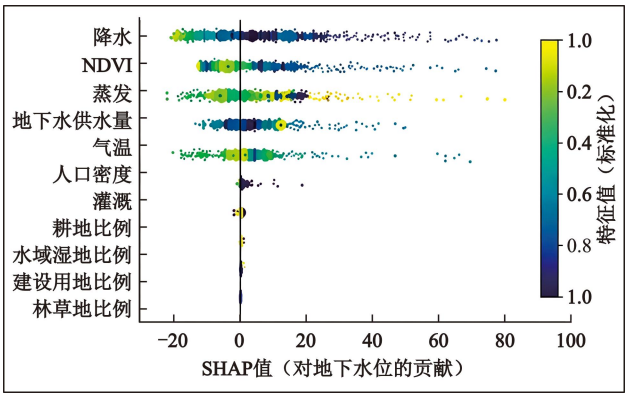
2022 年，地下水供水量仍是影响河南省平原区地下水位的首要因子，贡献占比为 33.75%，说明地下水开发利用强度对该时期地下水位格局仍具有显著控制作用。NDVI、蒸发、降水和气温的贡献占比分别为 24.02%、18.99%、13.90%和 8.68%，其中 NDVI 的作用更加突出。以上分析表明，2020—2022 年地下水位的驱动机制为“人类活动-生态”类型。



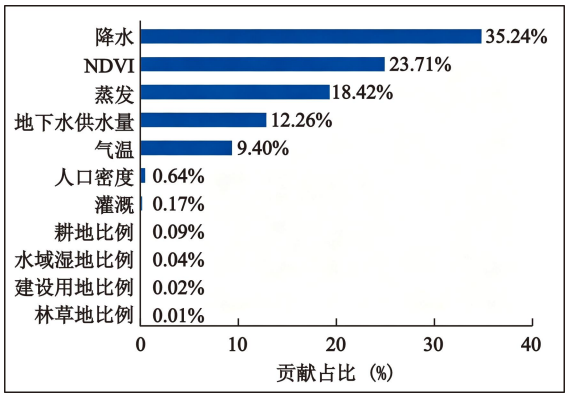
（a）2005 年 SHAP 贡献分布蜂群图



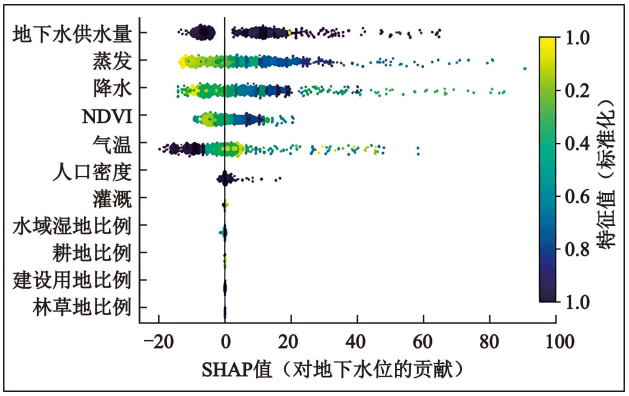
（b）2005 年 XGBoost-SHAP 驱动因子贡献占比



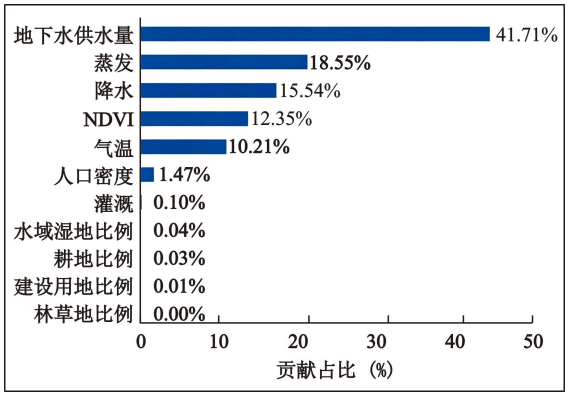
（c）2013 年 SHAP 贡献分布蜂群图



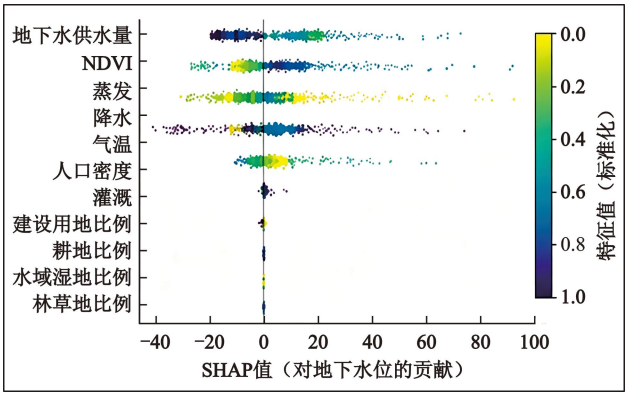
（d）2013 年 XGBoost-SHAP 驱动因子贡献占比



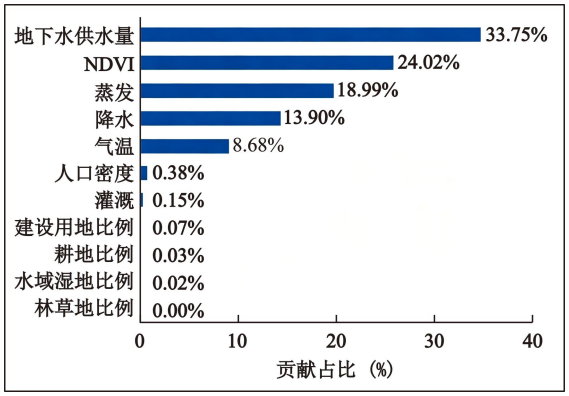
（e）2017 年 SHAP 贡献分布蜂群图



（f）2017 年 XGBoost-SHAP 驱动因子贡献占比



（g）2022 年 SHAP 贡献分布蜂群图



（h）2022 年 XGBoost-SHAP 驱动因子贡献占比

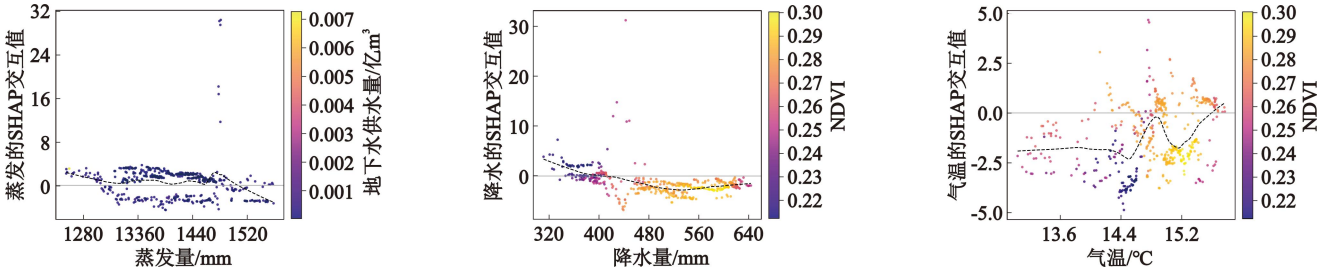
图 5　典型年份驱动因子 SHAP 贡献分布蜂群图及贡献占比

Fig.5　Contribution distribution bee swarm plot and contribution proportion of driving factors in typical years

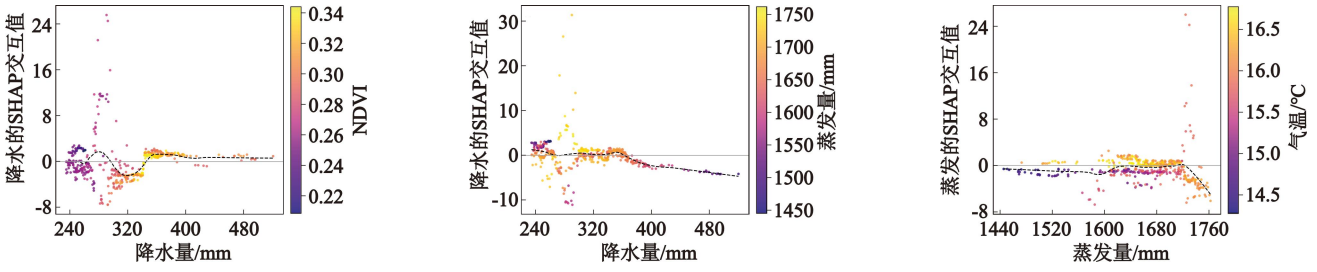
3.3.2　交互效应分析

本文选取典型年份交互作用最强的 3 组因子，通过 SHAP 依赖图对潜在交互关系进行分析。以某一因子的取值为横轴、对应的 SHAP 值为纵轴，并以另一因子的取值进行颜色编码，通过比较横轴因子取值相近时不同颜色样本的 SHAP 值分布差异，考察该因子的预测贡献随另一因子取值变化的特征，识别模型中的潜在交互作用，结果如图 6 所示。

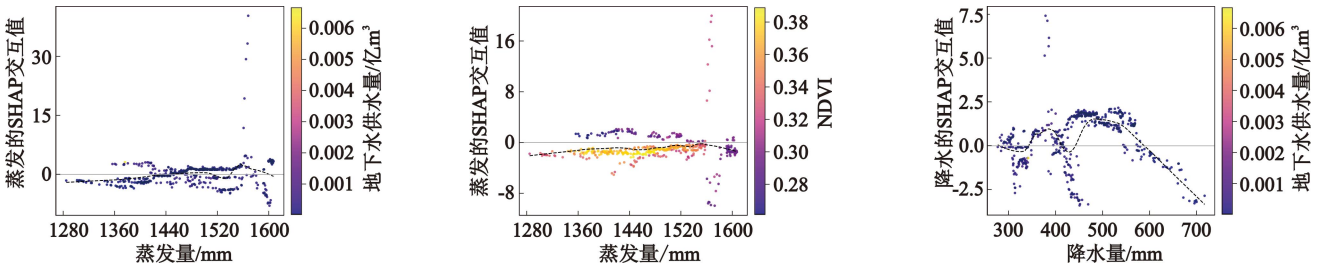
由图 6 可知，SHAP 交互依赖图进一步揭示了河南省平原区地下水位驱动因子之间的协同作用特征。2005 年，蒸发与地下水供水量、降水与 NDVI、气温与 NDVI 的交互作用最为显著，说明研究初期地下水开发利用与气候—植被条件之间已存在较强耦合关系，其中蒸发与地下水供水量的交互最强，表明在开采强度较高的背景下，大气蒸散需求的变化会进一步放大地下水位响应。2013 年，降水与 NDVI、降水与蒸发、蒸发与气温成为主要交互组合，说明该阶段地下水位对气候补给和植被响应过程更为敏感，体现出“气候—生态”协同作用特征。2017 年，蒸发与地下水供水量、蒸发与 NDVI、降水与地下水供水量的交互占主导地位，表明在人类活动影响较强的同时，蒸散耗水过程的调节作用进一步增强。2022 年，气温与 NDVI、蒸发与地下水供水量、地下水供水量与 NDVI 的交互最为突出，说明研究后期植被覆盖的调节作用更加明显。总体来看，研究区地下水位变化并非由单一因子驱动，而是表现为地下水开发利用、降水补给、蒸散消耗与植被覆盖之间的复杂交互过程，且主导交互关系存在阶段性差异。



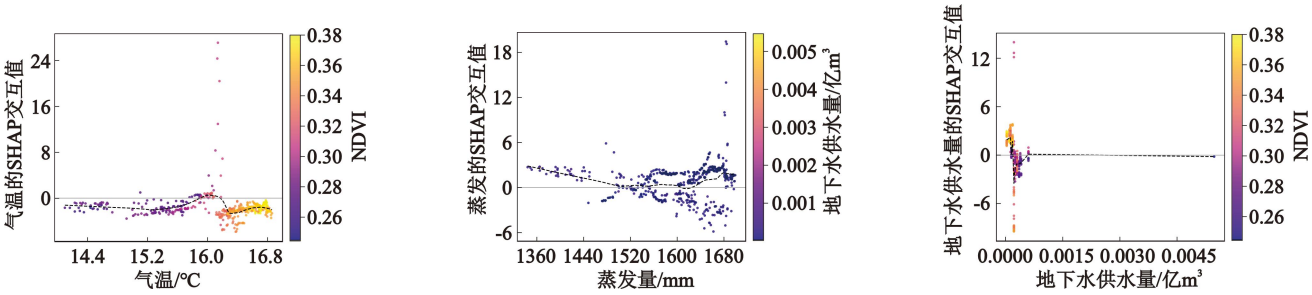
（a）2005 年蒸发和地下水供水量　（b）2005 年降水和 NDVI　（c）2005 年气温和 NDVI



（d）2013 年降水和 NDVI　（e）2013 年降水和蒸发　（f）2013 年蒸发和气温



（g）2017 年蒸发和地下水供水量　（h）2017 年蒸发和 NDVI　（i）2017 年降水和地下水供水量



（j）2022 年气温和 NDVI　　（k）2022 年蒸发和地下水供水量　　（l）2022 年地下水供水量和 NDVI

图 6　典型年份关键驱动因子 SHAP 交互依赖图

Fig.6　SHAP interaction dependence plots of key driving factors in typical years

4　讨论

4.1　地下水位时空演变特征

研究发现，河南省平原区浅层地下水位整体呈微弱下降趋势，核心区以显著下降为主，边缘地带出现回升，这与华北平原地下水演变规律的研究结论一致[20]，这表明在超采治理背景下，浅层地下水位已由全域单向下降转向具有显著空间分异的复杂格局。研究区核心区农业灌溉强度大、地下水开采基数高，边缘区受山前补给和地表水转换条件影响明显，形成了核心区下降与边缘区局部回升并存的空间格局。

在季节波动方面，研究区地下水位季节项呈现稳定的 12 个月周期性波动，枯水季与丰水季的水位变化节律清晰，地下水年内补给—排泄节律未受根本性破坏，水文功能保持相对稳定，这与淮河下游地区的研究结论一致[21]。

4.2　地下水位驱动机制的成因

河南省平原区浅层地下水位驱动机制的阶段性变化，本质上反映了地下水开发利用强度、气候水分条件、生态环境变化及供水结构调整之间相对作用关系的变化。

2005—2009 年，区域农业灌溉和城乡用水对地下水依赖程度较高，而部分引水和替代供水工程尚未充分发挥作用，使得地下水供水量成为重要影响因素；与此同时，降水、蒸发等自然因素总体相对稳定，自然补给与地下水开采之间形成一定制衡关系，因此地下水位整体保持相对平稳，表现为“人类活动-气候”复合驱动机制。2010—2015 年，地下水位阶段性升高，主要与降水量增加和生态环境改善有关：较强的降水补给提高了浅层地下水恢复能力，同时植被覆盖状况改善，使 NDVI 对地下水位变化的解释作用增强，驱动机制转向“气候-生态”协同驱动。

2016—2019 年，随着河南省经济社会快速发展，农业、工业和城镇生活用水需求增加，地下水开采压力明显加大，地下水供水量对地下水位变化的贡献显著增强，该阶段表现为“人类活动主导型”驱动机制。2020—2022 年，南水北调中线工程供水置换效应逐步显现，部分地区地下水供水量下降，地下水开采压力有所缓解；同时，2021 年河南“7·20”极端降水事件及偏湿气候背景增强了浅层地下水补给、土壤水分恢复和植被生长条件，使地下水位下降趋势得到一定遏制。因此，该阶段地下水位变化由单一开采压力主导转向供水结构调整与生态水文响应共同作用，表现为“人类活动-生态”复合调控机制。可见，研究区浅层地下水位驱动机制经历了由“人类活动-气候”制衡，到“气候-生态”抬升，再到“人类活动主导”下降，最终转向“人类活动-生态”复合调控的演变过程。

4.3　地下水位驱动机制的区域差异

河南省平原区位于华北平原南缘和南北气候过渡带，其浅层地下水位受人类活动与气候、生态等自然因素的共同驱动，呈现多阶段性特征。上述结果与黄河流域水储量受气候主导、多因子综合影响逐步增强的规律具有一定共性[22]，也与河南省南水北调受水区浅层地下水埋深变化研究[23]所反映的浅层地下水对气候和人类调控共同响应的认识相契合。

但研究区地下水位演变的驱动机制具有不同于华北平原其他区域的独特性。海河平原长期处于更强烈的地下水超采状态，浅层地下水位主要表现为长期快速下降、降落漏斗发育以及南水北调和压采治理后的止跌回升，其主控因素为地下水开采强度、外调水置换和超采治理措施[24]。淮北平原浅层地下水埋深普遍较浅，水位主要受降水、蒸发、地表水和浅埋地下水循环过程影响，季节波动和涝渍响应更为突出，演变机制以气候变化为主控。山东平原则表现出更强的空间异质性和人为管控特征，

部分地区浅层地下水位仍呈下降趋势，而部分地区在节水、压采、回灌和水源调配作用下出现回升[25]。

因此，河南省平原区浅层地下水位的阶段性演变特征及其驱动机制，是当地气候条件、生态环境与人类活动共同作用的结果，具有鲜明的区域特征。

5 结论

本文基于河南省平原区 2005—2022 年浅层地下水位及降水、气温、蒸发、浅层地下水供水量、人口密度、植被覆盖指数、灌溉强度和土地利用类型等多源驱动因子数据，综合运用 Sen-MK 趋势检验、STL 多时间尺度分解和 XGBoost-SHAP 机器学习模型，揭示了研究区浅层地下水位变化的时空演变特征及其阶段性驱动机制。主要结论如下：

1）2005—2022 年，河南省平原区浅层地下水位整体呈微弱下降态势，表现为 2005—2009 年相对平稳、2010—2015 年高位剧烈波动、2016—2019 年快速下降、2020—2022 年低位趋稳的阶段性特征。空间上，下降区占 78.51%，集中于平原核心区；上升区占 20.56%，主要位于边缘地带。

2）STL 分解表明，地下水位年内变化具有稳定的 12 个月周期性，研究区浅层地下水补给—排泄节律总体保持稳定。但残差项在个别年份出现异常波动，提示极端气候或短期人为扰动的影响。

3）XGBoost-SHAP 结果表明，不同典型年份地下水位主控因子存在明显差异。2005 年主要受地下水供水量、降水和蒸发共同影响，表现为“人类活动-气候”型；2013 年降水和 NDVI 贡献增强，表现为“气候-生态”型；2017 年地下水供水量贡献最高，表现为“人类活动”型；2022 年地下水供水量仍为首要因子，同时 NDVI 作用增强，表现为“人类活动-生态”复合调控型。

4）河南省平原区浅层地下水位驱动机制的阶段性演变，是自然水文过程与人类水资源调控共同作用的结果。研究期内，降水补给、蒸散消耗和植被覆盖变化构成了地下水位波动的自然基础，地下水开采、供水结构调整和调水工程则改变了地下水系统的受力状态。随着自然因子与人类活动因子相对作用强度的变化，驱动机制由早期的“人类活动-气候”制衡，逐步演变为“气候-生态”协同、“人类活动主导”以及“人类活动-生态”复合调控格局。

本文揭示了河南省平原区浅层地下水位变化的演变规律与协同驱动机制，但驱动因子的选取还不够全面，如未考虑水文地质条件的变化以及南水北调等引水工程的具体指标。后续研究可结合工程调度、水文地质分区和实际开采数据，进一步深化地下水位变化机制识别。

参 考 文 献

[1] 包芝林,吴彬,王翠,等.阿克苏河流域平原区地下水位动态变化及归因分析[J].环境科学与技术,2025,48(2):128-140.[Bao Zhilin, Wu Bin, Wang Cui, et al. Dynamic variation and attribution analysis of groundwater level in the plain area of Aksu River Basin [J].Environmental Science and Technology, 2025, 48 (2):128-140.]

[2] Perez N, Singh V, Ringler C, et al.Ending groundwater overdraft without affecting food security[J].Nature Sustainability, 2024, 7: 1007-1017.

[3] 秦欢欢,黄丽想.人类活动影响下北京市平原区地下水资源变化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(3):60-66,76.[Qin Huanhuan, Huang Lixiang. Study on groundwater resources variation in Beijing plain under the influence of human activities[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(3):60-66,76.]

[4] Xu Haijun, Liu Dongpeng. Study on groundwater storage changes in Henan Province based on GRACE and GLDAS[J]. Sustainability, 2025, 17(14): 6316.

[5] 李江,郝新梅,范琳琳,等.黑河中游绿洲地下水位空间变异性研究[J].水力发电学报,2015,34(11):106-115.[Li Jiang, Hao Xinmei, Fan Linlin, et al. Spatial variability of groundwater level in midstream oasis of Heihe River basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(11): 106-115.]

[6] Kartal V, Nones M, Topcu E, et al. Comparison of different techniques in determining groundwater levels trends in Türkiye[J]. Hydrological Processes, 2024, 38(8): e15244.

[7] Adombi A V D P, Chesnaux R, Boucher M A. Toward a methodology to explore historical groundwater level trends and their origin: the case of Quebec, Canada[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(6): 183.

[8] 陈彬鑫,何新林,杨丽莉,等.莫索湾灌区近22年来地下水埋深变化及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):155-160. [Chen Binxin, He Xinlin, Yang Lili, et al. Analysis of groundwater burial depth variation and its influencing factors in Mosuowan Irrigation District over the past 22 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(12): 155-160.]

[9] Mehmood K, Anees S A, Muhammad S, et al. Analyzing

vegetation health dynamics across seasons and regions through NDVI and climatic variables[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 11775.

[10] Lafare A E A, Peach D W , Hughes A G. Use of seasonal trend decomposition to understand groundwater behaviour in the Permo-Triassic Sandstone aquifer, Eden Valley, UK[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24: 141-158.

[11] 赵振华,罗振江,黄林显,等.基于 STL 和 Mann-Kendall 法的济南市降雨与地下水变化分析[J]. 水文,2022,42(6):73-77.[Zhao Zhenhua, Luo Zhenjiang, Huang Linxian, et al. Analysis of rainfall and groundwater variation in Jinan City based on STL and Mann-Kendall method[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(6):73-77.]

[12] 宋强敏,孙才志,郝帅.基于 XGBoost-SHAP 和 MGWR 模型的生态系统服务影响因素的空间异质研究：以辽河流域为例[J]. 水土保持研究,2026,33(4):377-389.[Song Qiangmin, Sun Caizhi, Hao Shuai. Spatial heterogeneity of ecosystem service influencing factors based on XGBoost-SHAP and MGWR models: a case study of Liaohe River Basin[J].Research of Soil and Water Conservation, 2026,33(4):377-389.]

[13] 邢丽亚,吴彬,刘坤,等.基于多源数据的吉木萨尔县地下水位动态变化与驱动因素定量识别[J].农业工程学报,2026,42(3):130-140.[Xing Liya, Wu Bin, Liu Kun, et al. Dynamic variation and quantitative identification of driving factors of groundwater level in Jimsar County based on multi-source data[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2026, 42(3):130-140.]

[14] Kim S, Alizamir M, Heddam S, et al. Development of the machine learning and deep learning models with SHAP strategy for predicting groundwater levels in South Korea[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 35523.

[15] Osman A I A, Ahmed A N, Chow M F, et al. Extreme gradient boosting (XGBoost) model to predict the groundwater levels in Selangor Malaysia[J].Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(2): 1545-1556.

[16] Hansen J A, Jurgens B C, Fram M S. Quantifying anthropogenic contributions to century-scale groundwater salinity changes, San Joaquin Valley, California, USA[J]. Science of The Total Environment, 2018, 642:125-136.

[17] 黄继超, 邓晓颖, 齐玉峰, 等. 河南省气候变化和人类活动对净生态系统生产力变化的影响[J].环境科学,2026, 47(4): 2370-2381.[Huang Jichao, Deng Xiaoying, Qi Yufeng, et al. Impacts of climate change and human activities on net ecosystem productivity in Henan Province[J]. Environmental Science, 2026, 47(4): 2370-2381.]

[18] 刘建奎,唐军,魏路,等.基于 STL 模型的地面沉降对地下水位响应时间滞后规律研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2025,48(3):282-290.[Liu Jiankui, Tang Jun, Wei Lu, et al. Study on hysteresis law of land subsidence response to groundwater level based on STL model[J].Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2025, 48(3):282-290.]

[19] 何景媛,肖墁华,游建飞,等.基于 GRACE 降尺度分析的江西省山丘区地下水储存量变化时空演变规律[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):21-32.[He Jingyuan, Xiao Manhua, You Jianfei, et al. Spatiotemporal evolution of groundwater storage variation in hilly areas of Jiangxi Province based on GRACE downscaling analysis[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6):21-32.]

[20] 赵勇,吴初,刘蓉,等.华北平原深层承压水演变规律与保护修复[J].中国水利,2026(2):19-28.[Zhao Yong, Wu Chu, Liu Rong, et al. Evolution law, protection and restoration of deep confined water in the North China Plain[J].China Water Resources, 2026(2):19-28.]

[21] 蒋芳婷,孟玉川,宋泓苇,等.淮河下游地区地表水与地下水同位素特征分析[J]. 水文,2022,42(1):90-96.[Jiang Fangting, Meng Yuchuan, Song Hongwei, et al. Isotopic characteristics of surface water and groundwater in the lower reaches of the Huaihe River[J].Journal of China Hydrology, 2022, 42(1):90-96.]

[22] 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. Analysis of terrestrial water storage and its influencing factors in the Yellow River Basin based on GRACE and GRACE-FO[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4):26-32.]

[23] 高婷,窦明,周雨泽,等.河南省南水北调受水区浅层地下水埋深变化分析[J].水文,2024,44(3):89-97.[Gao Ting, Dou Ming, Zhou Yuze, et al. Analysis on variation of shallow groundwater depth in the South-to-North water diversion receiving area of Henan Province[J].Journal of China Hydrology, 2024, 44(3): 89-97.]

[24] 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. Groundwater storage variation in the Haihe

Plain retrieved from gravity satellites and watershed water balance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(3):255-267.]

[25] 梁坤杰,刘奇缘,夏甫,等.人为因素对地下水埋深和资源量的影响响：以山东省为例[J].环境工程技术学报,2026,16(4):1608-1620. [Liang Kunjie, Liu Qiyuan, Xia Fu, et al. Impact of human factors on groundwater depth and resource quantity: a case study of Shandong Province[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2026,16(4):1608-1620.]

Changes and Attribution Analysis of Shallow Groundwater Level in the Plain Area of Henan Province Based on Machine Learning

ZHANG Juanjuan [1,2,3], ZHAN Jiang[4], ZHANG Jie[4]

(1.Ecological Environment Geological Service Center of Henan Provincial Geology Bureau, Zhengzhou 450053, Henan, China; 2.Engineering and Technology Research Center for Ecological Restoration of Mining Environment in Henan Province, Zhengzhou 450053, Henan, China;3. Engineering and Technology Research Center for Geothermal Energy Development in Henan Province, Zhengzhou 450053, Henan, China;4. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China)

Abstract: 【**Objective**】To reveal the spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of shallow groundwater levels in the plain areas of Henan Province, thereby providing a basis for sustainable regional groundwater resource management and the control of groundwater over-exploitation.【**Methods**】Based on multi-source data from 2005 to 2022, including shallow groundwater levels, air temperature, precipitation, NDVI, and shallow groundwater supply volume, the Sen-Mann-Kendall trend test, STL time-series decomposition, XGBoost-SHAP model and other methods were employed to systematically analyze the long-term spatiotemporal evolution, intra-annual seasonal fluctuation characteristics, and driving mechanisms of shallow groundwater levels.【**Results**】(1) Overall, shallow groundwater levels across Henan's plain areas showed a slight downward trend, featuring four distinct stages: relative stability from 2005 to 2009, intense high-amplitude fluctuations during 2010–2015, rapid decline in 2016–2019, and stabilization at low levels from 2020 to 2022. (2) Spatially, groundwater decline was concentrated in the core plain zone, with sporadic water level rises in marginal regions. (3) Groundwater levels exhibited a stable 12-month cycle, with a consistent recharge–discharge rhythm. (4) The dominant factors controlling groundwater level fluctuations vary significantly across different stages. Groundwater supply, precipitation, and evaporation jointly dominated in 2005; the contributions of precipitation and NDVI increased in 2013; groundwater supply contributed most in 2017 and remained the leading factor in 2022, when the contribution of NDVI increased. 【**Conclusions**】The evolution of shallow groundwater levels in the plain areas of Henan Province shows pronounced stage-dependence and spatial heterogeneity, with driving mechanisms successively manifesting as "human activity-climate" type, "climate-ecology" type, "human activity-dominated" type, and "human activity-ecology" type. These findings can provide a reference for regional groundwater regulation and over-exploitation control.

Keywords: shallow groundwater level; spatiotemporal evolution; driving mechanism; STL time series; XGBoost-SHAP; plain area of Henan Province