

# 豫北平原区干旱情境下地下水开采量多因素响应关系研究

王向博<sup>1\*</sup>, 李洪波<sup>2</sup>, 常文豪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2026年2月24日; 录用日期: 2026年3月28日; 发布日期: 2026年4月29日

## 摘要

豫北平原干旱灾害频发, 叠加长期超采导致地下水位持续下降, 已形成多个大型降落漏斗。在气候变化与干旱情景加剧的背景下, 传统的单一水量控制指标已难以满足地下水科学供水保障及可持续利用需求。为此, 本研究以河南省豫北平原为对象, 确定地下水位临界埋深, 构建并率定三维地下水流数值模型, 结合特大干旱情景, 采用拉丁超立方抽样生成100组开采量-补给量组合方案, 系统揭示不同干旱条件下地下水位降深与降水量对开采强度的响应特征。在此基础上, 构建随机森林模型, 实现水位降深、降雨量与开采量的非线性映射。模型测试集决定系数 $R^2$ 达0.9以上, 表现出优异的预测精度与泛化能力。研究提出了各子区在不同干旱情景下的地下水可开采量阈值, 为豫北平原干早期地下水科学调度与超采治理提供了定量依据与技术支撑。

## 关键词

豫北平原, 干旱情景, 地下水数值模拟, 随机森林, 响应关系

# Research on the Multi-Factor Response Relationship of Groundwater Extraction under Drought Conditions in the Northern Henan Plain Area

Xiangbo Wang<sup>1\*</sup>, Hongbo Li<sup>2</sup>, Wenhao Chang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd., Chengdu Sichuan

\*第一作者。

文章引用: 王向博, 李洪波, 常文豪. 豫北平原区干旱情境下地下水开采量多因素响应关系研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(4): 618-632. DOI: 10.12677/aep.2026.164061

## Abstract

Frequent drought disasters in the North Henan Plain, combined with long-term over-exploitation, have led to a continuous decline in groundwater levels and the formation of multiple large-scale depression cones. Under the intensifying context of climate change and drought scenarios, traditional single-index control methods for groundwater extraction are no longer sufficient to support scientific water supply security and sustainable groundwater utilization. To address this issue, this study focuses on the North Henan Plain in Henan Province, China. The critical depth of the groundwater level was determined, and a three-dimensional numerical groundwater flow model was developed and calibrated. Under extreme drought scenarios, 100 combinations of groundwater extraction and recharge were generated using Latin Hypercube Sampling. The response characteristics of groundwater level drawdown and precipitation to extraction intensity under various drought conditions were systematically analyzed. Based on this, a Random Forest model was constructed to establish the nonlinear mapping relationship among water level drawdown, precipitation, and extraction volume. The coefficient of determination ( $R^2$ ) for the test set exceeded 0.9, indicating excellent predictive accuracy and generalization capability. The study proposes thresholds for allowable groundwater extraction in different subregions under various drought scenarios, providing a quantitative basis and technical support for scientific groundwater management and over-extraction control during drought periods in the North Henan Plain.

## Keywords

North Henan Plain, Drought Scenario, Groundwater Numerical Simulation, Random Forest, Response Relationship

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

改革开放以来,河南省用水需求持续增长,豫北平原(豫北地区)地下水开发利用强度逐年加大,受历史遗留超采问题及局部集中高强度开采影响,该区浅层地下水位在多地出现显著下降,形成典型降落漏斗,并引发地面沉降、生态退化、土壤盐渍化等一系列环境地质问题。单纯以开采量作为单一控制指标,已难以全面、动态反映地下水开发利用的实际状态及潜在风险。为克服这一局限,国家层面明确提出“水位-水量双控”管理模式,将地下水位与取水总量有机结合,提供制度保障,推动区域地下水资源向可持续利用与精细化科学管理转型。

在国内谢新明等[1]学者提出将控制性关键水位划分为红、黄、蓝三区的理论框架,明确各区划分依据与原则。叶勇等[2]进一步发展了控制性水位与可开采量双重管理方法;Li等[3]则通过设定蓝线和红线水位,结合实时监测数据实现管理等级动态划分与开采方案优化。国际上,Henriksen等[4]以地下水位下降、河流基流减少、生态影响及水质退化等四项指标,率先构建了丹麦地下水可持续开采量评价标准。Senent-Aparicio等[5]开发了含水层可持续性指数,整合水文、环境与社会经济维度,用于评估超采区管理进展。Majidipour等[6]针对伊朗Mahidasht含水层,汇集开采强度、水质、脆弱性等多源指标,采用层

次分析法(AHP)计算综合可持续性指数,为水资源优化配置提供决策支撑。总体国内外进展表明,地下水管理已从单一水量控制逐步转向多指标、集成化框架,更加注重生态阈值与长期韧性。

本文运用 GMS 软件构建三维地下水流数值模型,经动态监测井验证后,设计不同干旱情景下的开采方案;基于超拉丁立方抽样模拟预测值,采用机器学习方法量化地下水位降深、降雨量与开采量的响应关系;结合干旱情景与响应规律,计算各分区地下水开采量阈值,为确立取水控制性指标提供科学依据,对支撑豫北平原地下水科学管理、供水安全保障及生态文明建设具有重要意义。

## 2. 研究区概况

研究区位于河南省北部的豫北平原,面积 19756.67 km<sup>2</sup>,属暖温带半湿润大陆性季风气候(见图 1)。地貌以冲洪积-冲湖积平原为主,海拔多低于 150 m;区内横跨海河、黄河两大流域,地表淡水资源丰富、水质优良。地下水主要赋存于第四系和新近系孔隙介质中。根据地下水循环条件、运动特征及含水介质埋藏特性,按界面埋深划分为三组含水层:第 I 组(埋深 < 50 m)、第 II 组(埋深 120~210 m)、第 III 组(埋深 250~310 m)。

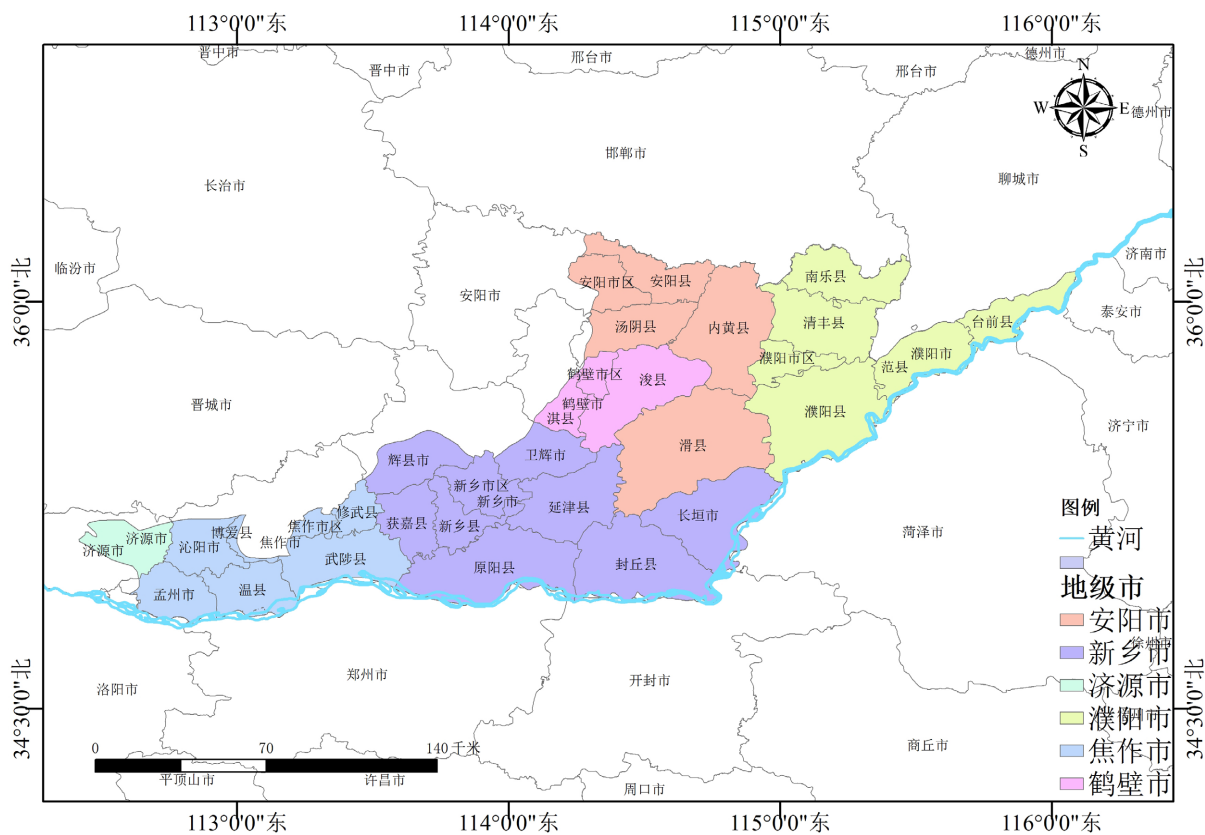


Figure 1. Location of the study area  
图 1. 研究区位置图

浅层地下水主要赋存于第四系孔隙含水层,以大气降水补给为主,辅以田间灌溉回渗和侧向径流;排泄以人工开采为主,河流排泄次之。深层地下水赋存于裂隙孔隙承压含水层,补给主要来自浅层越流,辅以少量侧向径流;排泄以人工开采为主。由于历史监测与管理不足,局部超采严重,已形成安阳-鹤壁-濮阳-新乡、武陟-孟州-温县等浅层地下水降落漏斗区。

### 3. 数据来源与研究方法

研究内容	数据来源	处理方法
干旱阶段划分	研究区 1960~2023 年降水数据集	滑动窗口法识别
地下水位埋深	研究区 2006~2020 年河南水资源公报	水量均衡法计算
地下水数值模型	华北平原地下水可持续利用调查评价报告	GMS 软件建模
机器学习模型	水位降深 - 降雨量 - 开采量数据集	随机森林法

## 4. 不同干旱阶段划分

### 4.1. 干旱阶段划分

采用滑动窗口算法,以月尺度降水距平指标表征的受旱面积为基础,确定不同干旱阶段阈值,并利用梯形带状滑动窗口动态识别干旱序列。针对序列中可能出现的突变,借鉴游程理论的干旱事件合并规则[7]:若单次结果仅一次超出阶段阈值,则仍归入当前阶段。特大干旱情景划分为四个阶段:① 露头期:受旱面积占比 30%~60%,且下月受旱面积增加;② 高峰期:受旱面积占比 >80%,且占比变化率 <50%;③ 持续期:受旱面积占比 80%~100%,且占比变化率 >50%;④ 缓解期:受旱面积占比 30%~80%,且下月受旱面积减少。基于研究区 299 个气象站点 1960~2023 年降水数据,分别计算日、旬、月尺度降水距平指标,采用反距离加权法(IDW)插值,统计各干旱等级受旱面积,并应用于干旱特征提取方法识别日、旬、月尺度干旱阶段[8][9]。识别结果显示,2019 年 2 月至 2020 年 5 月为特大干旱情景,划分为四个阶段:1) 露头期:2019 年 2~4 月;2) 高峰期:2019 年 5~8 月;3) 持续期:2019 年 9 月~2020 年 3 月;4) 缓解期:2020 年 4~5 月。

### 4.2. 不同干旱阶段地下水位

根据地下水功能,本文选取资源功能临界水位为地下水临界水位。资源功能临界水位定义为与地下水补给量与排泄量有关的水位,根据《地下水管控指标确定技术要求》,在研究区域地下水水位控制指标确定原则上以县级行政区为基本单元。资源功能临界水位埋深由下式计算:

以现状埋深  $Z_{基}$  为基准,不同干旱阶段下临界水位埋深计算公式为:

$$Z_{下临界} = Z_{基} + \Delta Z \quad (3.1)$$

$$\Delta Z = \frac{Q_{总补} - Q_{总排}}{10^2 * \mu * F} * T \quad (3.2)$$

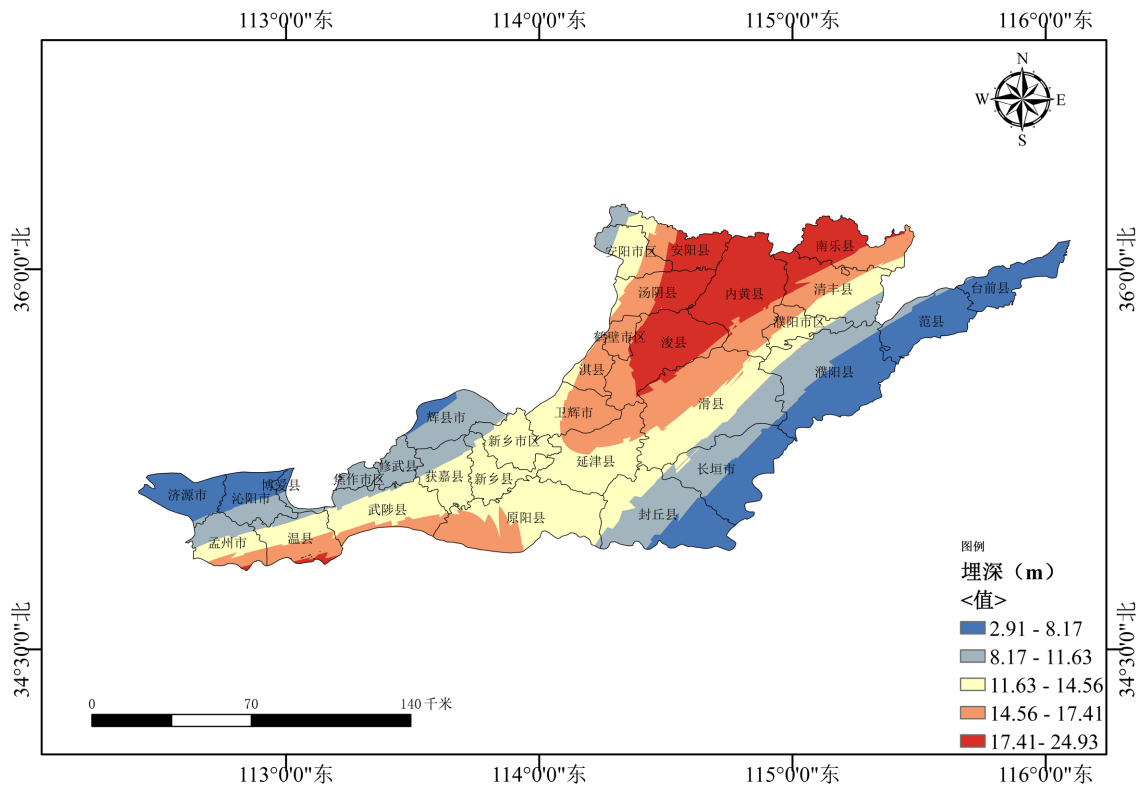
式中:  $Z_{下临界}$  ——下临界水位埋深, m;  $Z_{基}$  ——现状基准水位埋深, m;  $\Delta Z$  ——地下水埋深变化, m;  $Q_{总补}$ 、 $Q_{总排}$  ——地下水总补给量、地下水总排泄量, 万  $m^3$ ;  $F$  ——面积,  $km^2$ ;  $T$  ——评价时间;  $\mu$  ——岩土层之间的给水度, 无量纲。

在典型特大干旱情景下,利用水量均衡法,以 2020 年地下水位为基准年水位埋深,识别豫北平原区共 31 县区在不同干旱阶段下的地下水下临界水位埋深(见图 2)。

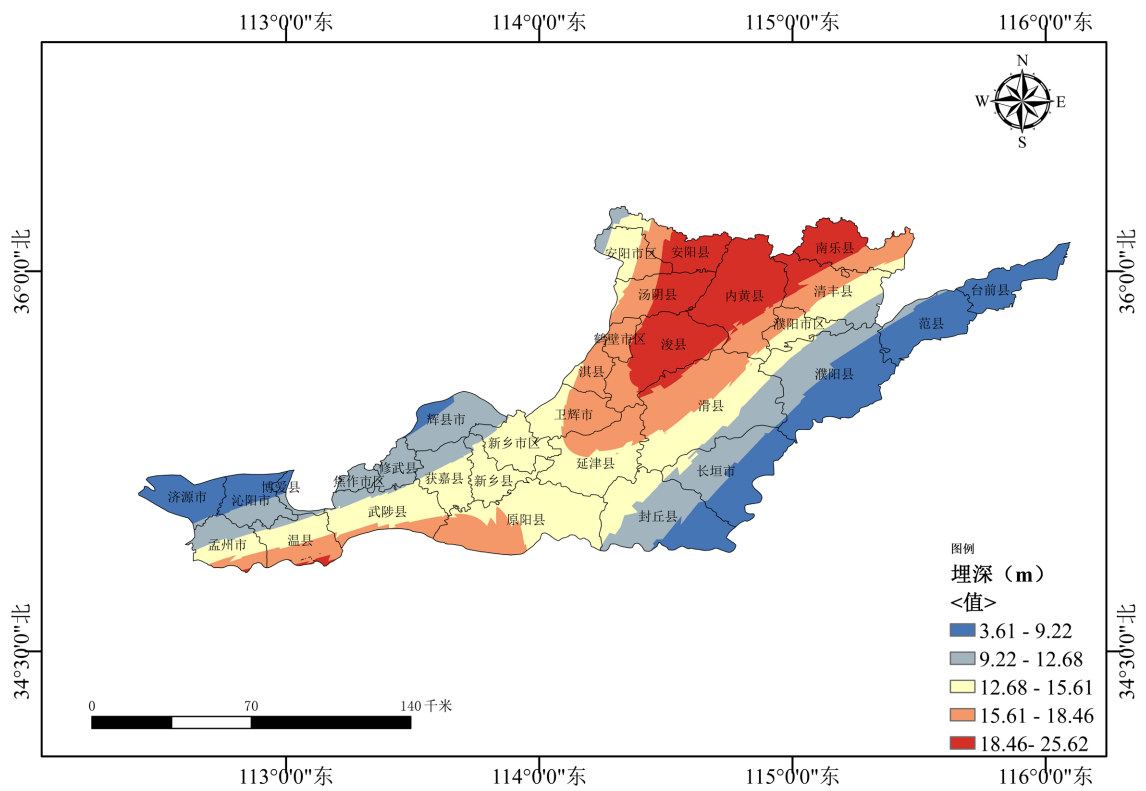
## 5. 三维地下水流数值模拟

### 5.1. 水文地质概念模型

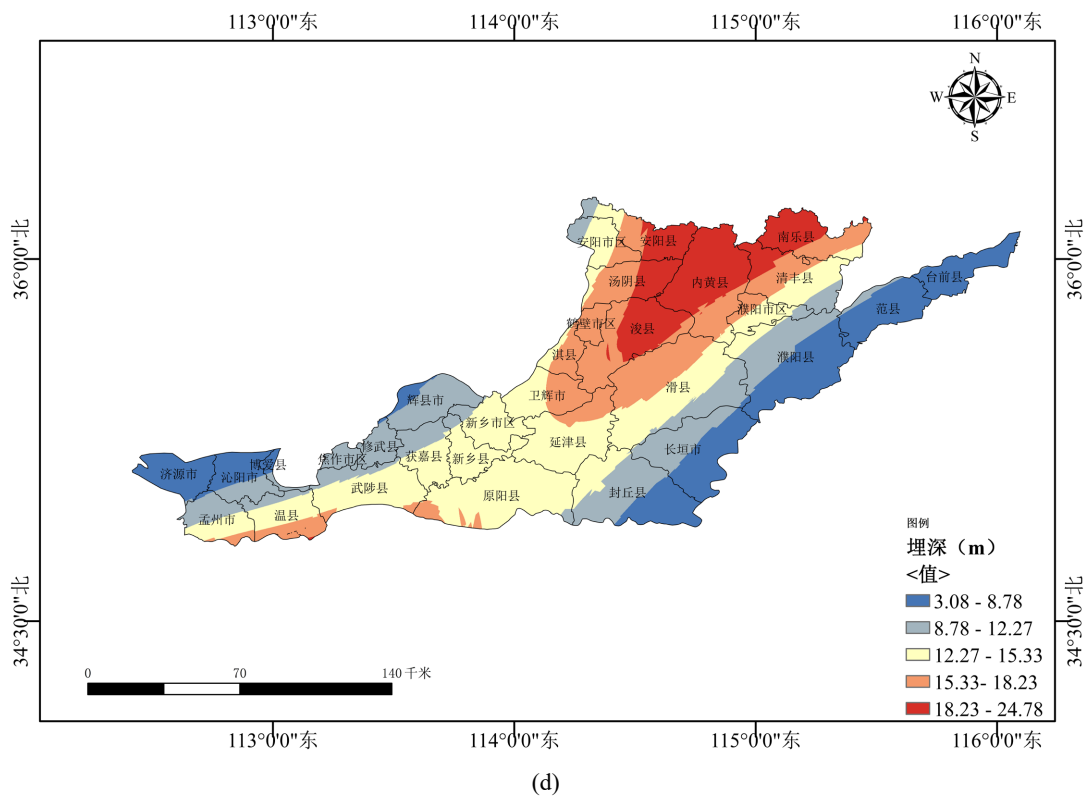
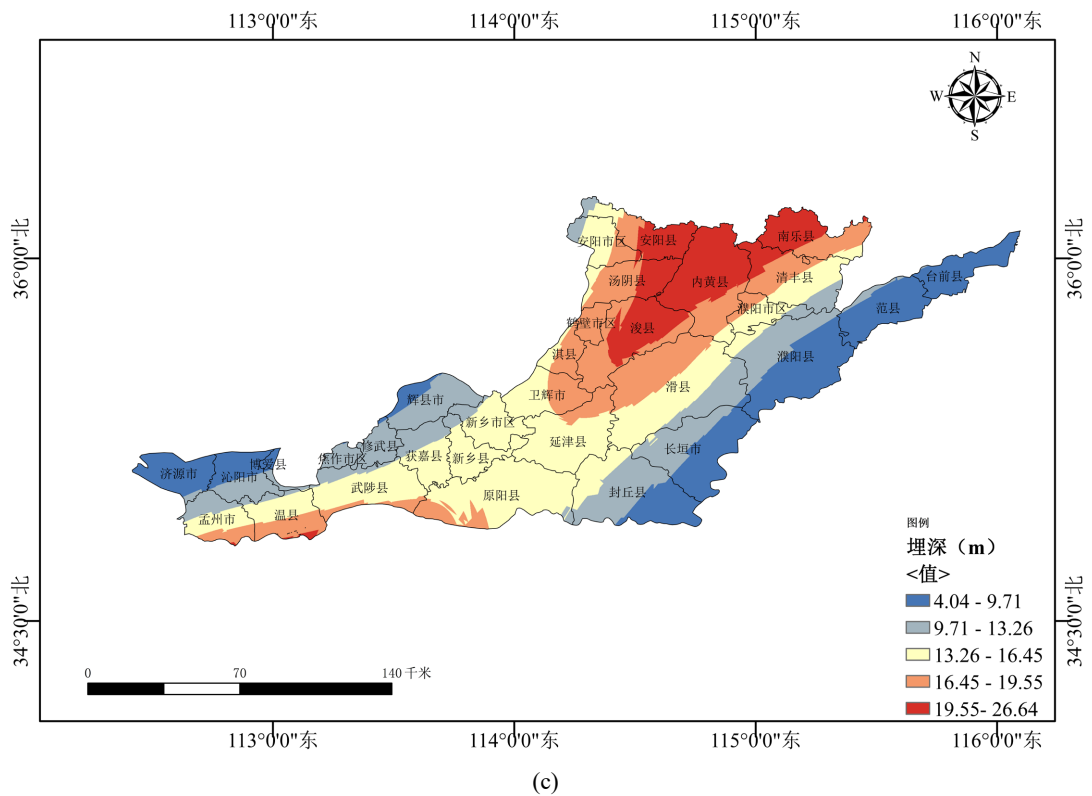
本文以豫北平原地下水为研究对象,综合区域水文地质条件、开采现状、岩层渗透性及水流特征,将地下水自上而下划分为潜水、微承压水和承压水,形成潜水 - 微承压 - 承压水含水系统[10]。主要岩性为砾卵石、粉砂等,厚度约 300 m。根据实际需要,将含水层介质概化为非均质各向异性,将整个系统概化为浅层潜水 - 中深层微承压 - 深层承压水三层结构。



(a)



(b)



**Figure 2.** Critical depth of the groundwater level. (a) Outcrop period, (b) Peak period, (c) Duration period, (d) Remission period  
**图 2.** 地下水临界水位埋深图。(a) 露头期, (b) 高峰期, (c) 持续期, (d) 缓解期

### 5.2. 边界条件概化

研究区北部及西部以山区与平原自然分界线为流入边界；模型第一层(潜水含水层)接受山区侧向补给，设为流量边界；第二、三层在此边界缺失，其北、西边界位于单一潜水区与多层含水层区交界处，设为隔水边界，无侧向补给。南部及东南部以黄河为界：模型第一层与黄河水力联系密切，设为流量边界；其余层位设为隔水边界。模型第一层顶界为潜水自由水面，作为系统上边界，通过该边界与外界发生垂向水量交换，包括大气降水入渗、灌溉回渗补给及蒸散发排泄等。浅层与深层含水层通过越流交换水量，越流量由两层水头差、弱透水层垂向渗透系数及厚度决定。模型底部以第四系底界为界，下伏第三系碎屑岩，设为隔水边界(见图 3)。

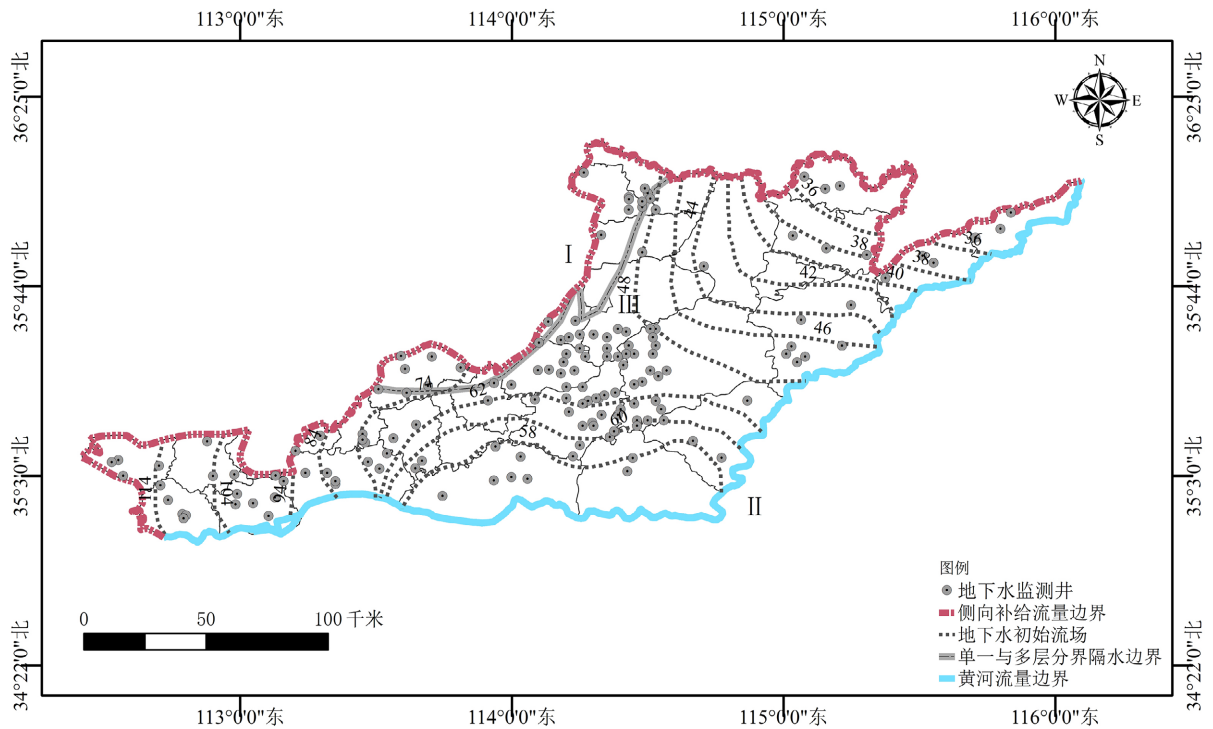


Figure 3. Boundary conditions and initial flow field of shallow groundwater

图 3. 浅层水边界条件及初始流场图

模拟时段为 2006~2020 年，共 180 个应力期，时间步长 30 天。各应力期内外部源汇项强度保持恒定，以 2006 年 1 月实测地下水流场作为初始流场。

### 5.3. 数学模型

通过前文对于水文地质概念模型的构建分析，可知研究区的三维非稳定流数学模型如下：

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \varepsilon, x, y, z \in \Omega, t \geq 0$$

$$h(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = h_0, x, y, z \in \Omega$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p, x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0$$

$$h(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = h_0, x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0$$

$$K_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q, x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \quad (4.1)$$

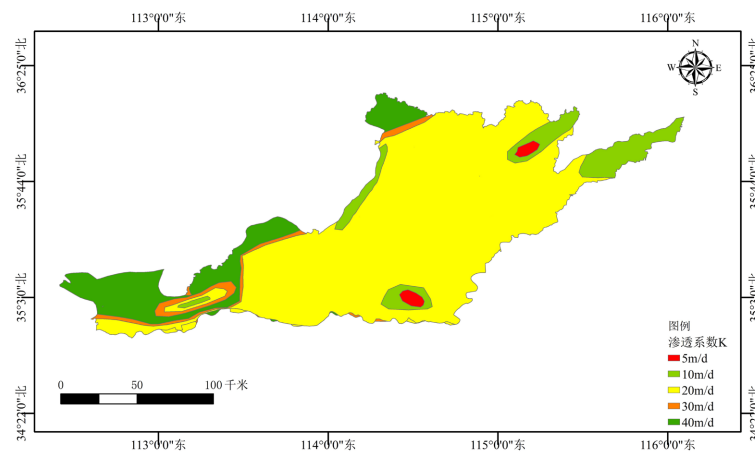
式中： $\Omega$ ——渗流区域； $h$ ——地下水系统的水位标高(m)； $K_x, K_y$ ——含水介质的水平渗透系数(m/d)； $K_z$ ——含水介质垂向渗透系数(m/d)； $\varepsilon$ ——含水层的源汇项(1/d)； $h_0$ ——系统的初始水位分布(m)； $S$ ——自由面以下含水层储水率(1/m)； $\Gamma_0$ ——渗流区域的上边界，即地下水的自由表面； $\mu$ ——潜水含水层在潜水面上的重力给水度； $p$ ——潜水面的蒸发和降水入渗强度等(m/d)； $\Gamma_1$ ——已知水位边界； $h$ ——已知边界水位值(m)； $\Gamma_2$ ——渗流区域的流量边界； $K_n$ ——边界面法线方向的渗透系数(m/d)， $n$ ——边界面的法线方向； $q$ —— $\Gamma_2$ 边界的单位面积上的流量(m/d)，流入为正，流出为负，隔水边界为0。

#### 5.4. 模型的求解与识别

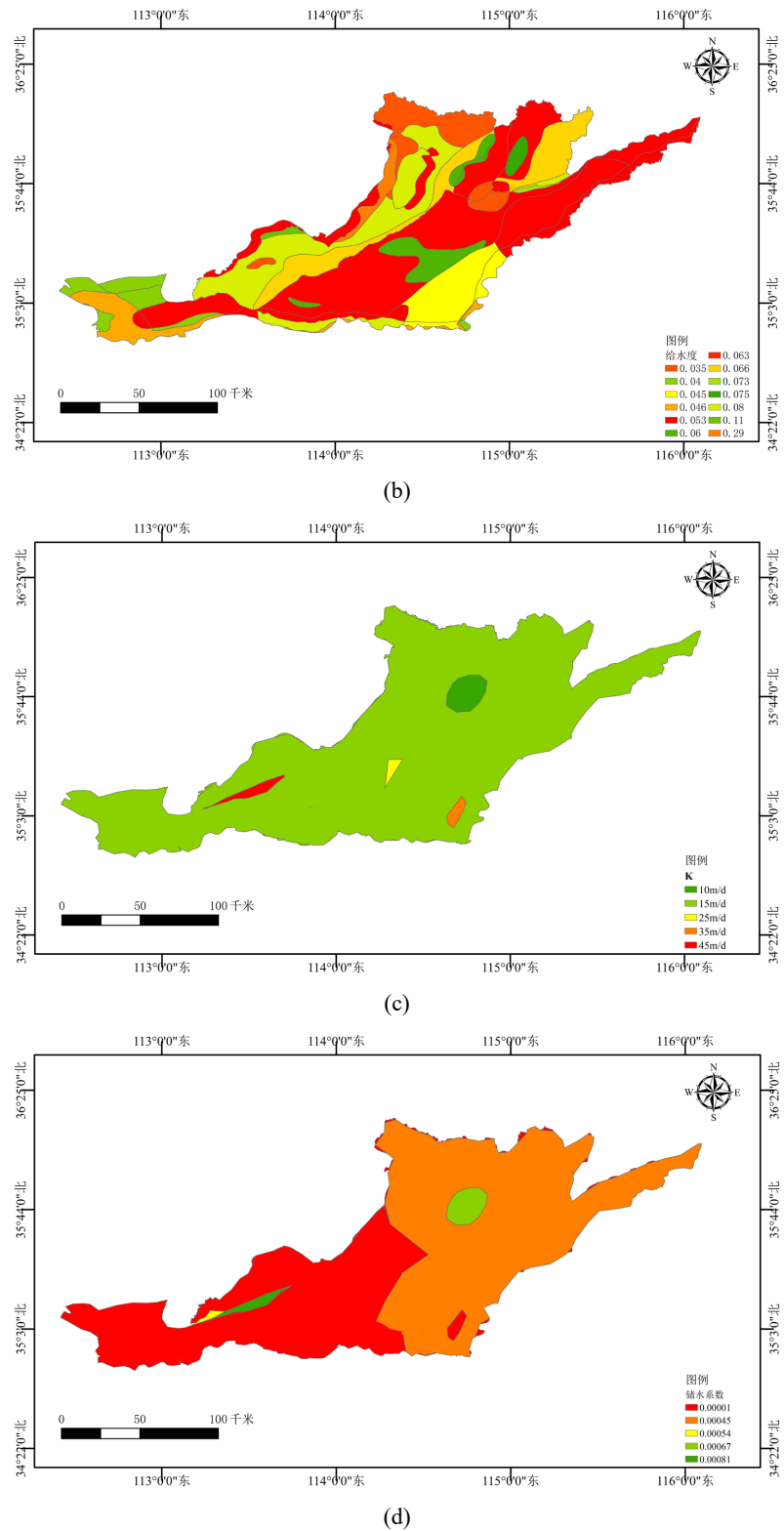
基于研究区水文地质概念模型，并综合考虑模拟精度与基础资料分辨率，对研究区进行三维网格离散化[11][12]。平面上采用均匀网格，划分为340列×165行；垂向上根据含水层结构分为3层，其中第1层(潜水含水层)有效计算单元19,850个。

含水层水力参数依据区域水文地质条件并结合抽水试验及经验值综合确定。潜水含水层渗透系数( $K$ )和给水度( $\mu$ )总体呈现由山前冲洪积扇向平原中部、由河谷向两侧逐渐减小的分布规律，其中渗透系数介于5~40 m/d，给水度介于0.03~0.29；承压含水层渗透系数介于1~50 m/d，储水系数( $S$ )为 $10^{-3}$ ~ $10^{-6}$ 量级(见图4)。模型源汇项分为补给与排泄两大类。补给项主要包括降水入渗补给、农业灌溉回归补给、侧向径流补给及河道渗漏补给；排泄项主要包括潜水蒸散发和人工开采。为便于源汇项的统计整理及模型识别与验证，将平原区按市县级行政边界划分为31个计算分区，所有源汇项数据均以此为基本单元进行统计，并通过GMS软件的分区(Zone)模块将属性值映射至对应网格单元(见图5)。

模型以2020年1月实测地下水流场作为初始流场，以2020年全年为识别验证期。验证结果表明，2020年末模拟地下水位与同期观测水位克里金插值结果空间分布格局基本一致，流场整体形态吻合良好(见图6)。101个长期观测井的年末水位计算值与观测值平均残差为0.51 m，标准均方根误差(RMS)为2.1 m；识别期内模拟值与观测值的相关系数( $R^2$ )大于0.95(见图7)。水量均衡分析显示，全区补给总量与排泄总量相对误差小于±15%，表明所建数值模型能够可靠地反映研究区地下水系统的实际动态特征，满足后续预测与管理的需求。



(a)



**Figure 4.** Distribution of hydrogeological parameters. (a) Hydraulic conductivity of the phreatic aquifer, (b) Specific yield of the phreatic aquifer, (c) Hydraulic conductivity of the confined aquifer, (d) Storage coefficient of the confined aquifer

**图 4.** 水文地质参数分布图。(a) 潜水含水层渗透系数, (b) 潜水含水层给水度, (c) 承压含水层渗透系数, (d) 承压含水层储水系数

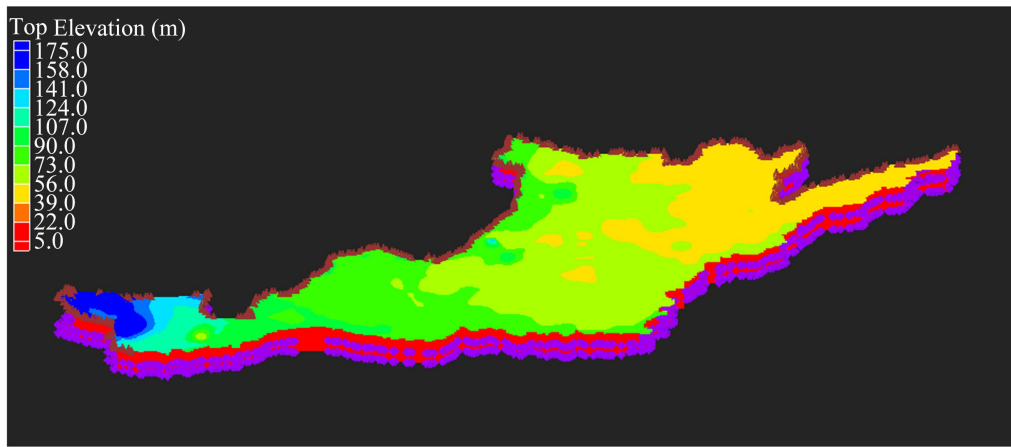


Figure 5. Three-dimensional geological model  
图 5. 三维地质模型图

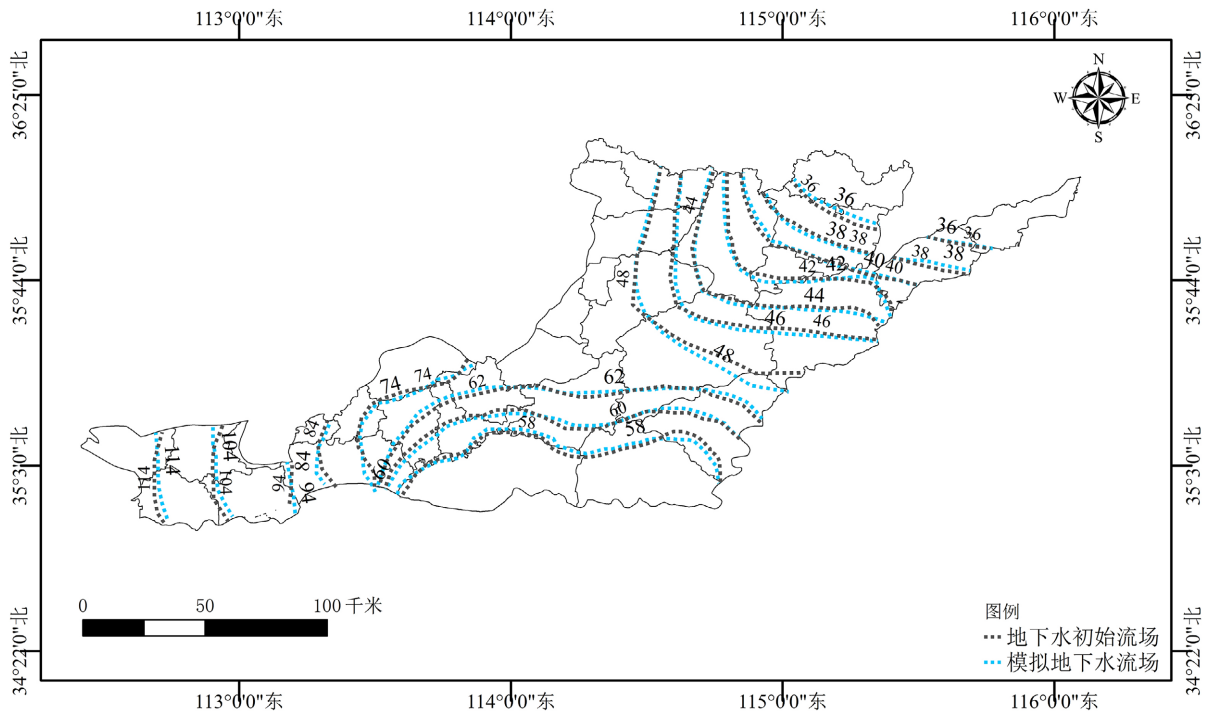
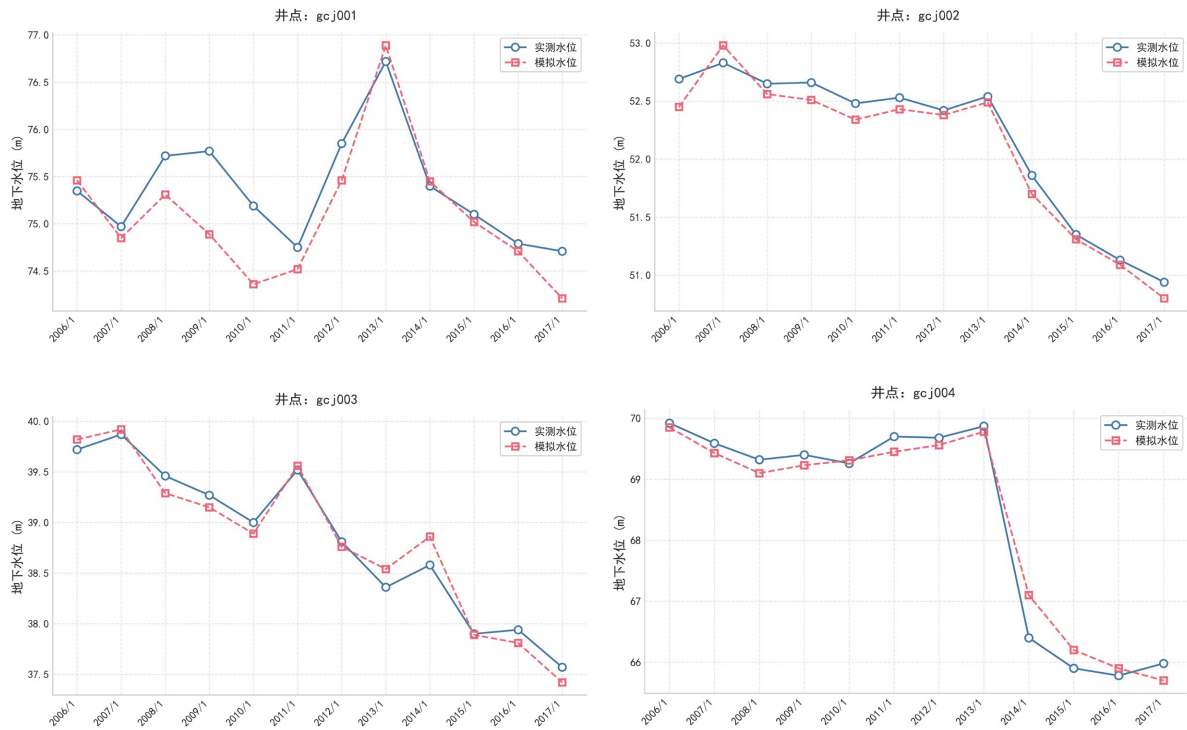


Figure 6. Fitting of groundwater flow field in the North Henan Plain  
图 6. 豫北平原地下水流场拟合图

## 6. 地下水水位降深 - 降雨量 - 开采量响应关系

### 6.1. 不同干旱阶段水位降深预测

本研究以 2020 年实际开采量作为基准开采情景，并基于特大干旱情景，设计四种干旱阶段的递进开采强度梯度。采用拉丁超立方抽样在各子区开采量可行空间内生成高效、均匀的样本。每种干旱情景下分别生成 25 组开采量组合，共计 100 组开采方案。随后，将抽样得到的开采量与降水入渗补给量及其他源汇项输入已率定验证的地下水数值模型(初始流场为 2020 年末实测水位)，预测各子区代表性监测点在不同开采情景下的水位降深(见表 1)。



**Figure 7.** Water level fitting of observation wells in the North Henan Plain  
**图 7.** 豫北平原观测井水位拟合图

**Table 1.** Mean groundwater level drawdown by county under different extraction scenarios  
**表 1.** 不同开采方案各县水位降深均值表

区县名	露头期(m)	高峰期(m)	持续期(m)	缓解期(m)
新乡市区	1.10	2.70	2.50	1.60
新乡县	1.00	1.72	2.70	0.87
卫辉	1.45	1.96	1.40	1.34
辉县	1.32	2.07	3.37	1.70
获嘉	1.69	2.05	3.73	0.96
原阳	0.96	1.28	2.62	1.05
延津	1.47	1.50	2.40	0.96
封丘	1.25	1.28	2.73	1.21
长垣	1.50	2.48	2.50	0.85
焦作市区	1.20	1.40	1.50	0.80
修武	1.60	1.50	1.60	0.90
博爱	1.50	1.48	1.57	1.00
武陟	3.38	1.56	2.54	1.16
温县	2.97	2.90	2.90	1.98
孟州	2.78	4.55	5.47	3.22

续表

沁阳	2.25	3.80	4.50	3.15
安阳市区	2.05	3.50	3.20	0.90
安阳县	0.52	1.48	3.13	1.32
汤阴	2.57	3.70	3.17	2.87
内黄	3.12	1.14	1.96	1.36
滑县	2.38	3.01	3.67	1.46
濮阳市区	1.00	2.20	4.25	0.76
濮阳县	3.37	3.97	6.07	2.02
范县	2.98	2.53	2.97	1.84
清丰	2.52	1.58	1.75	1.64
南乐	3.11	3.00	5.23	2.50
台前	1.00	2.10	2.67	0.77
浚县	2.69	3.03	5.14	1.67
淇县	2.62	2.85	2.90	0.75
淇滨区	2.55	2.55	2.58	0.35
济源	1.41	1.66	2.35	1.40

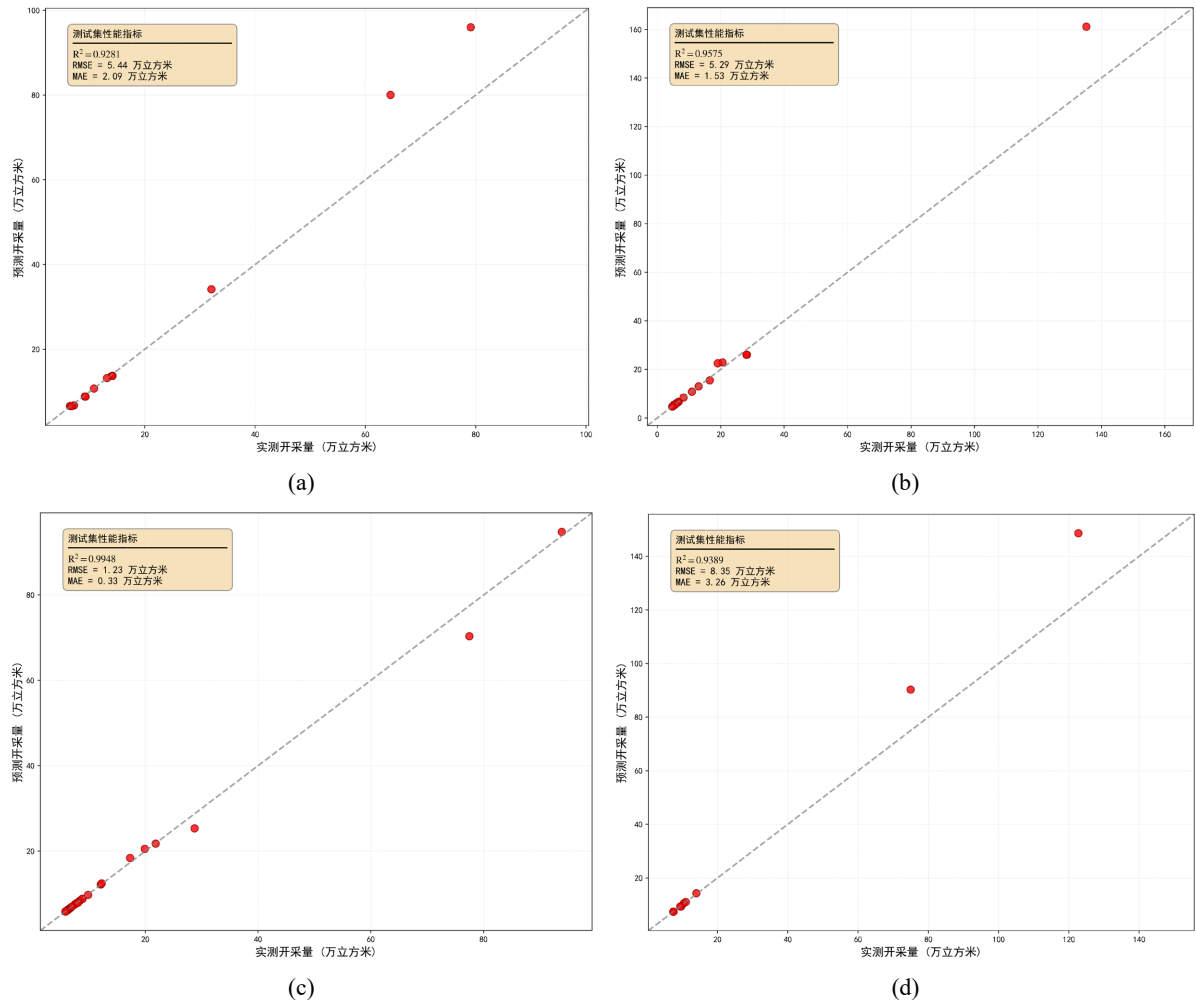
## 6.2. 随机森林模型构建

本研究采用 Python 的 scikit-learn 机器学习库实现随机森林回归模型。为获得最佳模型性能,采用 10 折交叉验证方法对关键超参数进行系统优化,包括树的数量、最大树深度、节点最小分裂样本数、叶节点最小样本数以及分裂准则。数据集按 8:2 比例划分为训练集与测试集,其中训练集用于模型拟合,测试集用于独立性能评估。模型性能采用两种常用评价指标进行量化:均方根误差(RMSE)和决定系数( $R^2$ )。

为实现区域地下水开采量的快速、高精度预测并揭示主要驱动因子,本研究基于拉丁超立方抽样生成的 100 组数值模拟场景,构建了随机森林代理模型。输入特征主要包括各分区地下水开采量和降水量 [13][14]。数据预处理过程严格执行,包括缺失值插补、异常值检测与剔除、特征标准化等步骤,以确保数据集的完整性、一致性和数值稳定性。模型训练完成后,用于区域地下水开采量的预测,并通过特征重要性分析识别关键影响因子[15]。结果表明,该模型能够有效捕捉地下水开采量的复杂非线性变化趋势(见图 8)。测试集的  $R^2$  值均大于 0.9,表明模型具有极高的拟合精度、良好的泛化能力和强鲁棒性。得益于集成学习的方差降低机制以及系统化的超参数优化,随机森林模型成功克服了传统回归方法在高维、非线性地下水系统中常见的过拟合或欠拟合难题,展现出优异的非线性映射能力与抗噪性能。

## 6.3. 豫北平原区干旱阶段地下水可开采量预测

选取 2019/02~2020/05 作为典型特大干旱场景,利用地下水运动数值模拟模型,通过随机森林模型,计算得到豫北各县市地下水可开采量,结果见表 2,豫北平原区地下水开采量随着干旱由露头期向高峰期、持续期、缓解期的发展,可供水量总体呈现先增加后减少再增加的变化趋势,主要原因是地下水临界水位的识别过程中,考虑了地下水含水层调蓄性,即通过地下水含水层的水资源调蓄能力可实现地下水资源的丰蓄枯采。



**Figure 8.** Random Forest model for groundwater extraction in Xinxiang urban area. (a) Outcrop period, (b) Peak period, (c) Duration period, (d) Remission period

**图 8.** 新乡市区地下水开采量随机森林模型。(a) 露头期, (b) 高峰期, (c) 持续期, (d) 缓解期

**Table 2.** Threshold values of available groundwater for different stages in each county of the study area

**表 2.** 研究区各区县地下水不同阶段可供水量阈值表

地市	区县	露头期(万 m <sup>3</sup> )	高峰期(万 m <sup>3</sup> )	持续期(万 m <sup>3</sup> )	缓解期(万 m <sup>3</sup> )
新乡市	新乡市区	3440.14	3797.44	4309.18	1632.90
	新乡县	2913.85	3280.26	5944.45	2316.38
	卫辉市	1212.24	1303.55	2755.01	701.14
	辉县市	1965.66	3229.83	5191.08	1446.76
	获嘉县	1671.76	2318.64	4624.74	825.73
	原阳县	1745.90	3751.45	7258.36	1789.31
	延津县	2722.42	2835.28	5138.18	951.95
	封丘县	2045.71	3433.30	6171.33	1140.32
	长垣市	1631.43	2857.31	4774.11	676.90

续表

焦作市	焦作市区	952.24	751.23	1286.26	343.03
	修武县	1046.86	1046.86	1616.07	454.11
	博爱县	934.86	1079.60	1452.47	431.04
	武陟县	4123.37	5183.91	6411.04	2422.46
	温县	3701.71	4204.08	7433.57	1793.65
	孟州市	2784.63	3405.18	5594.60	1529.53
	沁阳市	3342.62	5484.19	5487.32	1652.31
安阳市	安阳市区	1739.19	3104.38	5956.67	1265.06
	安阳县	1072.46	1675.13	3672.41	1003.28
	汤阴县	2249.76	3658.40	6650.86	1414.36
	内黄县	6088.31	7889.76	13753.84	3496.57
	滑县	5582.34	8245.22	13957.11	3698.02
濮阳市	濮阳市区	1471.88	1876.17	3731.77	653.49
	濮阳县	2523.49	3343.29	5306.42	620.43
	范县	1629.34	2039.97	4898.49	789.48
	清丰县	3184.95	4662.94	8089.61	1895.53
	南乐县	1595.65	2440.30	4967.82	845.83
	台前县	642.89	1280.06	2585.29	206.28
鹤壁市	浚县	5505.14	6149.89	11618.74	2355.89
	淇县	1421.21	1472.29	2775.88	598.47
	鹤壁市区	654.12	363.53	1168.64	629.39
济源市	济源市区	2444.95	4309.18	4864.83	1297.43

## 7. 讨论

通过对豫北平原各区县现状地下水开采量与随机森林模型预测阈值的对比分析,在特大干旱场景下,新乡市、焦作市、安阳市、濮阳市、鹤壁市和济源市的现状开采量分别距离阈值约 0.38 亿  $m^3$ 、0.58 亿  $m^3$ 、0.16 亿  $m^3$ 、0.19 亿  $m^3$ 、0.13 亿  $m^3$  和 0.25 亿  $m^3$ ,从总体地市可供水量来看,并未出现明显超采现象。然而,部分区县在干旱持续期出现局部超采,但在干旱缓解期均未超采。这表明在整体调控下,全区地下水开采尚处于可控范围,但局部高压区仍需关注。需要指出的是,随机森林模型本身存在一定局限性。首先,该模型基于历史水位与开采数据进行训练,未充分考虑地下水补给延迟、含水层非均质性及水量空间分布差异等物理过程,因此对部分区县的高精度预测可能存在偏差。其次,随机森林具有“黑箱”特性,其预测结果难以直接揭示水文机制,也无法明确量化单一因素对超采的贡献。因此,在实际水资源管理中,应结合物理模型模拟与监测数据,对模型预测结果进行综合判断。

## 8. 结论

以豫北平原为研究对象,本文系统梳理了区域水文地质条件,基于 GMS 平台构建三维地下水流数值

模型；通过多情景模拟预测，结合随机森林方法量化降雨量 - 水位 - 开采量响应关系，进而计算干旱阶段地下水可开采量阈值。主要结论如下：

1) 地下水水位降深与降雨量是主导因素。随降雨量下降、水位降深增大，开采量呈显著上升趋势；模型显示地下水水位与开采量、降雨量间存在良好拟合关系。

2) 典型特大干旱情景下，各市地下水可供水量分别为：新乡市 10.38 亿  $\text{m}^3$ 、焦作市 7.59 亿  $\text{m}^3$ 、安阳市 9.62 亿  $\text{m}^3$ 、濮阳市 6.13 亿  $\text{m}^3$ 、鹤壁市 3.47 亿  $\text{m}^3$ 、济源市 1.29 亿  $\text{m}^3$ 。不同水文地质分区开采量阈值空间差异显著，为实施精准化地下水开采管控提供了科学依据。

## 参考文献

- [1] 谢新民, 柴福鑫, 颜勇, 等. 地下水控制性关键水位研究初探[J]. 地下水, 2007(6): 47-50+64.
- [2] 叶勇, 谢新民. 地下水控制性水位管理分区研究[J]. 黑龙江水专学报, 2009, 36(1): 116-119.
- [3] Li, F., Feng, P., Zhang, W. and Zhang, T. (2013) An Integrated Groundwater Management Mode Based on Control Indexes of Groundwater Quantity and Level. *Water Resources Management*, **27**, 3273-3292. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0346-8>
- [4] Henriksen, H.J., Trolldborg, L., Højberg, A.L. and Refsgaard, J.C. (2008) Assessment of Exploitable Groundwater Resources of Denmark by Use of Ensemble Resource Indicators and a Numerical Groundwater-Surface Water Model. *Journal of Hydrology*, **348**, 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.056>
- [5] Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., García-Aróstegui, J., Bielsa-Artero, A. and Domingo-Pinillos, J. (2015) Evaluating Groundwater Management Sustainability under Limited Data Availability in Semiarid Zones. *Water*, **7**, 4305-4322. <https://doi.org/10.3390/w7084305>
- [6] Majidipour, F., Najafi, S.M.B., Taheri, K., Fathollahi, J. and Missimer, T.M. (2021) Index-Based Groundwater Sustainability Assessment in the Socio-Economic Context: A Case Study in the Western Iran. *Environmental Management*, **67**, 648-666. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01424-7>
- [7] 王晓峰, 张园, 冯晓明, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 206-214.
- [8] 张强, 谢五三, 陈鲜艳, 等. 1961-2019 年长江中下游区域性干旱过程及其变化[J]. 气象学报, 2021, 79(4): 570-581.
- [9] Li, L., Peng, Q., Xu, J., Gu, X. and Cai, H. (2024) Widespread Enhancement and Slower Occurrence of Agricultural Drought Events in Drylands of the Yellow River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **52**, Article 101692. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101692>
- [10] 刘殷. 大区域地下水流数值模型的构建与应用——以华北平原为例[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [11] 刘丽花, 张树清. 基于 GMS 的多约束下三维地下水系统可视化模型构建[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(4): 506-511.
- [12] Höglund, N.B., Sparrenbom, C., Barthel, R. and Haraldsson, E. (2024) Groundwater Modelling for Decision-Support in Practice: Insights from Sweden. *Ambio*, **54**, 105-121. <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02068-7>
- [13] Asfaw, D., Smith, R.G., Majumdar, S., Grote, K., Fang, B., Wilson, B.B., *et al.* (2025) Predicting Groundwater Withdrawals Using Machine Learning with Limited Metering Data: Assessment of Training Data Requirements. *Agricultural Water Management*, **318**, Article 109691. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109691>
- [14] Raza, A., Ryo, M., Ghazaryan, G., Baatz, R., Main-Knorn, M., Inforsato, L., *et al.* (2025) Predicting Regional-Scale Groundwater Levels at High Spatial Resolution Using Spatial Random Forest Models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **144**, Article 104918. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104918>
- [15] Kim, J., Ma, Y. and Maxwell, R.M. (2024) Integrating Groundwater Pumping Data with Regression-Enhanced Random Forest Models to Improve Groundwater Monitoring and Management in a Coastal Region. *Frontiers in Water*, **6**, Article 1509945. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1509945>