

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250136

地下水水位降落漏斗评价方法研究与应用

朱静思¹, 王 哲^{2,3}, 南 天⁴, 张志才⁵

(1. 水利部海河水利委员会水文局, 天津 300170; 2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072; 3. 水利部海河水利委员会, 天津 300170; 4. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 5. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 科学划分评价地下水水位降落漏斗是实施地下水超采治理和保护的重要基础。结合我国地下水动态分析评价和管理实际, 提出了深浅层漏斗划分基本规定、评价指标、分级标准及影响要素评价方法, 在全国层面统一了地下水水位降落漏斗划分和评价方法标准。以京津冀地区为研究对象, 系统分析了自2019年以来实施华北超采综合治理对漏斗演变的影响。结果表明, 2023年与2018年相比, 京津冀浅层漏斗呈现稳定型特征, 深层漏斗呈现缩减型特征, 漏斗面积减少约99%, 各漏斗中心水位均明显回升。构建了XGBoost集成学习模型, 京津冀浅层漏斗发展变化主要受人为因素影响, 其次是气象因素。其中, 地下水开采、累积降水量和河湖生态补水量的影响最为显著, 影响贡献分别为23.1%、23.0%、15.2%。

关键词: 地下水水位降落漏斗; 评价方法; 演变特征; 影响因素

中图分类号: TV211.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0038-04

Research and Application of Evaluation Method of Groundwater Level Drop Funnel

ZHU Jing-si¹, WANG Zhe^{2,3}, NAN Tian⁴, ZHANG Zhi-cai⁵

(1. Hydrology Bureau of Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300170, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300170, China;
4. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China;
5. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Scientific classification and evaluation of groundwater level funnels is an important basis for the treatment and protection of groundwater overexploitation. Based on the actual situation of groundwater dynamic analysis, evaluation and management in China, this paper put forward the basic provisions, evaluation indexes, classification standards and evaluation methods of influencing factors for the division of deep and shallow funnels. At the national level, the classification and evaluation criteria of groundwater level funnels have been unified. Taking the Beijing-Tianjin-Hebei region as the research object, this paper systematically analyzed the impact of the comprehensive control of overmining in North China since 2019 on the evolution of funnel. The results show that compared with 2018, the shallow funnel presented a stable type in 2023, while the deep funnel presented a reduced type. The area of the deep funnel was reduced by about 99%, and the water level in the center of each funnel was obviously rising. Based on the XGBoost integrated learning model, the development and change of the shallow funnel in the Beijing-Tianjin-Hebei region were mainly influenced by human factors, followed by meteorological factors. Among them, groundwater exploitation, accumulated precipitation and ecological water recharge of rivers and lakes have the most significant impacts, with impact contributions of 23.1%, 23.0% and 15.2%, respectively.

Key words: groundwater funnel; evaluation method; evolution characteristics; influencing factor

收稿日期: 2025-01-19, 修回日期: 2025-03-11, 接受日期: 2025-03-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U21A2004); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基金(SK202308)

作者简介: 朱静思(1988-), 女, 硕士、高级工程师, 研究方向为水文水资源, E-mail: 735077092@qq.com

1 引言

地下水水位降落漏斗是指由于过度开采地下水造成局部水位低于周边区域水位,引起一定范围内地下水水位形成漏斗形态,称为地下水水位降落漏斗^[1]。目前,地下水水位降落漏斗划定方法不统一、漏斗评价指标体系不明确,不能满足地下水漏斗区站网规划、科学监测、修复治理等管理需求。在华北尤其京津冀地区,地下水是重要的供水水源,地下水过度开采形成连片降落漏斗^[2-4]。随着华北地区地下水超采综合治理持续推进,准确识别分层地下水水位降落漏斗演化特征和影响因素,可为科学制定地下水压采回补方案奠定基础。已有关于地下水漏斗划分和评价方面的研究,如赵伟玲等^[5]总结了河北省漏斗划分关键问题和方法要点;王晓光等^[3]按照形成时间、开采井数量、危害程度和发展趋势对地下水降落漏斗进行了详细分类,为漏斗评价提供了参考;朱琴等^[1]提出了不同尺度区域确定漏斗边界方法的差异性;南天等^[6]采用机器学习方法建立漏斗演变识别模型,分析了漏斗影响要素和影响贡献,但现有研究尚未提出全国统一的漏斗评价方法。对此,结合我国地下水动态分析评价和管理实际,本文提出了全国地下水水位降落漏斗评价方法,规定了统一的漏斗划分基本要求、评价方法等,作为水利行业技术指南应用推广;并基于该方法,系统评价了京津冀地区自 2019 年实施超采综合治理以来深浅层地下水漏斗分布、规模、演变特征及影响因素。研究成果对支撑华北平原地下水超采精准治理、地下水水位降落漏斗修复和区域水资源科学调配具有重要意义。

2 漏斗划分的基本规定

本文提出的漏斗评价方法适用于我国由于地下水开采形成的松散沉积物孔隙水区域漏斗及基岩风化程度高、有统一水力联系的裂隙和岩溶区漏斗。不同地区对含水层组的研究和划分程度不一,统一分为浅层漏斗和深层漏斗进行评价。为准确识别漏斗形态和区域年际性地下水补排特征,主要针对常年性漏斗进行评价,评价周期宜每年一次,主要以年末地下水水位监测数据为依据划分漏斗,识别漏斗发展情势。

划分漏斗前应首先确定基本评价站网和基础数据。分深浅层选取地下水监测站,在漏斗中心

及边界应加密布设。站网密度按照监测层位统计,应满足《地下水监测工程技术标准》(GB/T 51040-2023)^[7]中地下水超采区 15 ~ 60 站/ 10^3 km^2 的密度要求。

漏斗边界识别是准确划分漏斗的关键^[5]。目前,漏斗划分常用方法有三种:①以地下水分水岭中心点作为漏斗边界,地下水分水岭是地下水流场的真实边界,符合水文地质学领域的划分原则,但实际地下水流场非常复杂,划分难度大、技术要求高,划分结果受人为因素影响大。②最大封闭等水位线法,以闭合的最高等水位线作为漏斗边界,适用于快速识别漏斗范围。③区域给定值法固定某一水位边界标准,适用于漏斗演变情势对比分析。后两种方法简便、客观且实用性强。

3 漏斗评价方法体系

3.1 评价指标

漏斗评价指标主要包括漏斗数量、中心水位、平均水位、面积和体积。漏斗数量分别按浅层单一漏斗、深层单一漏斗、浅层复合漏斗、深层复合漏斗等进行统计。漏斗中心水位为漏斗范围内最低等水位线所包围的区域内监测站实测水位最小值;对于复合型漏斗,应逐个统计漏斗中心水位。漏斗平均水位、面积、体积可通过插值网格进行计算。

3.2 分级标准

漏斗规模根据面积大小划分为四级:①特大型,面积 $\geq 3\,000 \text{ km}^2$;②大型,面积 $\geq 1\,000 \text{ km}^2$ 且 $< 3\,000 \text{ km}^2$;③中型,面积 $\geq 500 \text{ km}^2$ 且 $< 1\,000 \text{ km}^2$;④小型,面积 $< 500 \text{ km}^2$ 。

浅层漏斗演变情势按漏斗平均水位变化速率划分为三级:①发展型。漏斗平均水位呈下降趋势,下降速率大于 0.5 m/a ;②稳定型。漏斗平均水位平均变化速率在 $-0.5 \sim 0.5 \text{ m/a}$ 之间;③缩减型。漏斗平均水位呈上升趋势,回升速率大于 0.5 m/a 。深层漏斗演变情势的变化速率标准可根据深层地下水年平均水位变幅适当加大。

3.3 影响要素评价

区域地下水水位降落漏斗是由于区域地下水长期超采,开采量持续超过补给量,从而形成漏斗状地下水水位。通过分析漏斗水均衡演变,可为研判漏斗发展情势提供依据。漏斗变化的影响要素主要包括降水量、水面蒸发量、河湖水位和流量、越流补给和排泄、开采量等。

4 京津冀分层漏斗分布与演变特征

京津冀平原区共有地下水自动监测站 5 117

处(图 1),其中浅层监测站 2 979 处,站网密度约 33 处/1 000 km²,深层监测站 2 138 处,站网密度约 23 处/1 000 km²。根据 2023 年末浅深层地下水流域(图 2),浅层地下水在京津冀山前平原中部形成多个闭合漏斗,深层则在东部地区形成闭合漏斗。

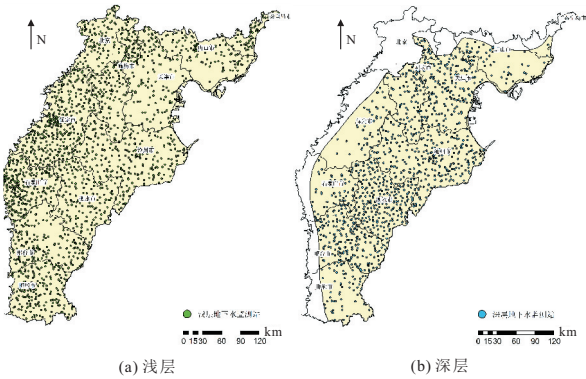


图 1 京津冀平原区浅层、深层地下水监测站分布
Fig. 1 Distribution of shallow groundwater monitoring stations and deep groundwater monitoring stations in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain

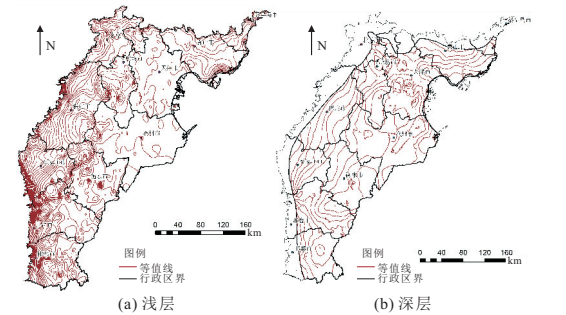


图 2 京津冀平原区 2023 年末浅层、深层地下水水位等值线
Fig. 2 Contour line of shallow groundwater level and deep groundwater level in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain by the end of 2023

为准确分析漏斗演变特征,采用区域给定值法确定漏斗边界。充分考虑华北地区以往漏斗评价经验和管理要求给定边界等水位线标高,浅层漏斗采用-15 m 闭合等水位线划定,深层漏斗采用-70 m 闭合等水位线划定。由于华北平原第四系含水介质是多层组叠加的含水层组结构,一般将Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ含水层组概化为深层含水层。

4.1 浅层漏斗分布与演变特征

2023 年末京津冀平原浅层漏斗分布于太行山前地区,涉及北京市、河北省保定、石家庄、衡水西北部、邢台等地区(图 3(a))。2023 年末浅层漏斗共有 6 个,其中大型漏斗 2 个,为河北省宁柏隆浅层漏斗、高蠡肃饶浅层漏斗,小型漏斗 3 个,为河北省雄县固安浅层漏斗、丰南浅层漏斗、隆尧浅层漏斗,北京市朝阳—顺义漏斗由中型漏斗缩减为小型(表 1)。

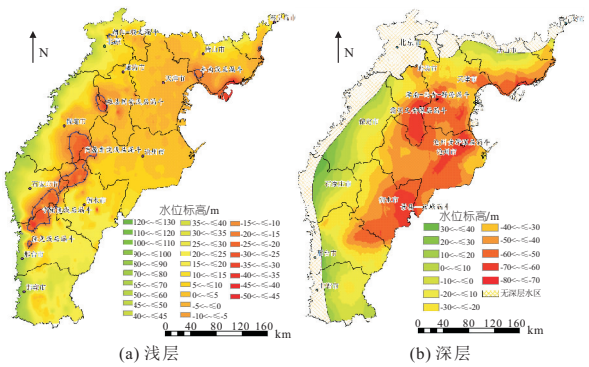


图 3 2023 年京津冀浅层、深层漏斗分布图

Fig. 3 Distribution of shallow funnel and deep funnel in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2023

表 1 京津冀平原区浅层地下水水位降落漏斗基本情况

Tab. 1 Basic situation of shallow groundwater funnel in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain area

漏斗名称	漏斗中心	漏斗中心水位/m			漏斗面积/km ²		
		2018 年	2023 年	水位变幅	2018 年	2023 年	面积变化
朝阳—顺义黄义漏斗	朝阳区黄港—长店	-18.38	-2.56	15.82	621	240	-381
宁柏隆浅层漏斗	隆尧县乡观站	-38.00	-39.69	-1.69	1 620	1 484	-136
高蠡肃饶浅层漏斗	高阳县水利局站	-30.13	-22.35	7.78	2 419	2 417	-2
隆尧浅层漏斗	东良站	-18.74	-24.52	-5.78	11	40	29
雄县固安浅层漏斗	雄县站	-23.67	-20.06	3.61	376	324	-52
丰南浅层漏斗	柳树圈站	-19.33	-20.95	-1.62	72	140	68

2023 年与 2018 年相比,浅层漏斗总体呈现稳定型特征,漏斗面积基本稳定,各漏斗中心水位多为小幅回升或下降,仅北京朝阳—顺义漏斗回升幅度达 15.82 m。2023 年浅层漏斗总面积 4 588 km²,较 2018 年面积仅减少 5.7%,其中宁柏隆、高蠡肃饶 2 个大型漏斗面积相对稳定。宁柏隆漏斗、丰南漏斗、隆尧漏斗中心水位累计分别下降 1.69、1.62、5.78 m,朝阳—顺义漏斗、高蠡肃饶漏斗中心水位累计分别上升 15.82、7.78 m。

4.2 深层漏斗分布与演变特征

2023 年末京津冀平原深层漏斗主要位于东部平原,涉及天津市、河北省廊坊、沧州、衡水东部等地区。2023 年末深层漏斗共有 3 个,天津市津南—西青—静海深层漏斗、河北省黄骅沧县深层漏斗由大型漏斗缩减为小型,河北省霸州文安深层漏斗为小型漏斗。

2023 年与 2018 年相比,深层漏斗呈现缩减型特征,漏斗面积大幅缩减,各漏斗中心水位多呈明显回升态势。2023 年深层漏斗总面积 567 km²,较 2018 年面积减少近 90%。津南—西青—

静海漏斗深层第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ承压含水层组中心水位累计分别上升 23.06、25.10、8.70 m;黄骅沧县漏斗深层第Ⅳ、Ⅴ承压含水层组中心水位累计分别上升 25.42、30.99 m;霸州文安漏斗、景县故城漏斗、南宫枣强漏斗中心水位累计分别上升 4.38、18.16、10.19 m(表 2)。

表 2 京津冀平原区深层地下水水位降落漏斗基本情况
Tab. 2 Basic situation of deep groundwater funnel in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain area

漏斗名称	漏斗中心	漏斗中心水位/m		水位 变幅	漏斗面积/km ²	
		2018 年	2023 年	年	2018 年	2023 年
津南—西青—静海中亭堤 4(Ⅲ组)		-88.8	-65.74	23.06	2 434	2
深层漏斗	跃进河泵站 5(Ⅳ组)	-94.82	-69.72	25.1		
	杨柳青水厂 4(Ⅴ组)	-96.29	-87.59	8.7		
景县故城深层漏斗 留智庙		-90.7	-72.54	18.16	1 564	0
南宫枣强深层漏斗 刘李祥深		-73.49	-63.3	10.19	98	0
黄骅沧县深层漏斗	黄骅市第二水厂(Ⅳ组)	-96.94	-71.52	25.42	1 049	10
	南大港东(Ⅴ组)	-107.54	-76.55	30.99		
霸州文安深层漏斗 清北扬水站		-96.38	-92.00	4.38	256	19

5 漏斗演变影响因素分析

根据已有研究,漏斗的分布和演变情势主要受自然因素、人为因素、含水层水力学特性和地形因素共同影响^[6]。为进一步定量研究华北地区超采治理对地下水演变的驱动机制,以 2018 年末至 2023 年末京津冀平原浅层地下水漏斗为分析对象,选取降水量、蒸发量、河湖补水、地下水开采量、地面高程、坡度、降水入渗系数和给水度 8 个特征变量,建立 XGBoost 集成学习模型,分析不同特征变量对漏斗演变的影响程度。

5.1 模型方法

采用 XGBoost 方法分析各特征要素对研究区地下水位漏斗的影响程度。XGBoost 为一种改进的集成树模型,每个决策树均基于对残差进行拟合,并使用梯度优化算法进行训练,具有较高的预测性能和可解释性^[8-9]。模型预测方法为:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^k f_k(X_i) \quad f_k \in F \quad (1)$$

式中, $\hat{y}_i$ 为模型预测值; k 为树的数量; F 为回归树的集合空间也称为(CART); X_i 为第 i 个数据点的特征向量。

样本共计 3 540 个,将其中 80%(2832 个)作为训练集进行训练,20%(708 个)作为测试集进行验证。采用决定性系数 R^2 对模型模拟精度进行评价,其取值范围为[0,1]。 R^2 的值越接近 1,表明模型预测结果与实际测量结果越接近。

XGboost 模型主要调节参数为评估器个数和分枝深度。经验证,评估器设置为 100、分枝深度设置为 5。模型整体精度可达 0.97,其中训练集

精度 99%,测试集精度 95%。

5.2 结果分析

综合来看,人为因素、气象因素、含水层水力学特性和地形因素对京津冀地区浅层漏斗发展变化的影响贡献依次为 38%、24%、18%、17%。从单因素来看(图 4),地下水开采影响贡献最大,为 23.1%,由于漏斗形成的主要原因是区域地下水排泄量远超过补给量,而在京津冀平原漏斗区排泄量中最主要的部分就是地下水开采,开采强度越大,漏斗扩张越明显。其次为累积降水量和河湖补水量,贡献率分别为 23%、15.2%。降水是京津冀地区地下水的主要补给来源,累积降水对漏斗发展变化的贡献率达 23.0%。河湖补水对漏斗发展变化影响也较为明显,贡献率达 15.2%。可见自 2018 年华北地区实施河湖补水以来,回补水量对河道周边区域浅层含水层也有一定的补给作用,抑制了地下水漏斗的发展。

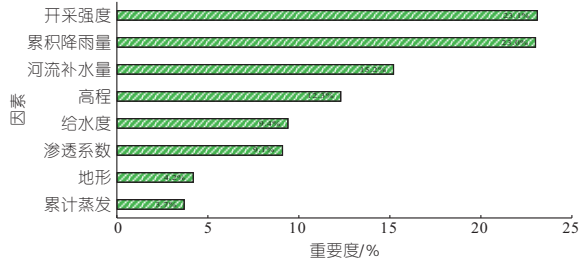


图 4 京津冀地区漏斗演化各因素影响贡献

Fig. 4 Influence and contribution of various factors on funnel evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei region

6 结论

a. 在充分认识我国不同地区浅深层漏斗分布与演化动态的基础上,结合各地区已有的漏斗划分研究成果,提出了全国统一的地下水水位降落漏斗划分基本规定和指标评价、分级标准、影响要素评价方法体系,并作为水利行业技术指南应用推广,为超采治理评估等工作奠定了基础。

b. 2023 年与实施华北超采治理前 2018 年相比,京津冀深浅层漏斗演变特征不同。浅层漏斗呈现稳定型特征,漏斗面积减少 3%,各漏斗中心水位多为小幅回升或下降,变化幅度为 2~5 m;深层漏斗呈现缩减型特征,漏斗面积减少近 90%,各漏斗中心水位均明显回升,回升幅度高达 31 m。

c. 根据模拟分析,京津冀浅层漏斗发展变化主要受人为因素包括开采、河湖补水等影响;其次是气象因素包括降水、蒸发等。从各要素来看,地下水开采、累积降水量和河湖补水量的影响最为显著,贡献率分别为 23.1%、23.0%、15.2%

(下转第 5 页)

4 结论

a. 影响梅汛期洪水预报精度的关键因素包括关联测站数据缺失、西乐站与分水江水库流量数据的不一致性以及模型预热期不足等问题,为改进耦合模型的实际应用提供了明确方向。

b. 通过系统分析实测与预报数据的差异,验证了参数修正对提升模型性能的有效性,其中洪峰流量误差控制至 15% 以内,确定性系数提高至 0.85 以上,显著增强了预报结果的可靠性。

c. 当前模型对强降雨集中时段的滞后响应尚未完全解决,未来需重点优化数据同化机制与延长预热期,以进一步提升复杂降雨条件下的预报时效性。

参考文献:

- [1] 姬战生,刘小勇,王军,等. 基于系统聚类的分水江站水位分类预报和区间预报[J]. 水电能源科学, 2023, 41(2): 11-14. (JI Z S, LIU X Y, WANG J, et al. Classification forecast and interval forecast for water level of Fenshuijiang station based on systematic clustering[J]. Water resources and power, 2023, 41(2): 11-14. (in Chinese))

(上接第 41 页)

参考文献:

- [1] 朱琴,许伟,田晓华. 平原地下水位降落漏斗划定标准研究[J]. 水土保持应用技术, 2023(4): 22-24. (ZHU Q, XU W, TIAN X H. Study on demarcation standard of groundwater level drop funnel in plain[J]. Technology of soil and water conservation, 2023(4): 22-24. (in Chinese))
- [2] 李文鹏,王龙凤,杨会峰,等. 华北平原地下水超采状况与治理对策建议[J]. 中国水利, 2020(13): 26-30. (LI W P, WANG L F, YANG H F, et al. The groundwater overexploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain[J]. China water resources, 2020(13): 26-30. (in Chinese))
- [3] 王晓光,郭常来,何海洋,等. 地下水降落漏斗分类研究[J]. 地质与资源, 2019, 28(5): 487-492. (WANG X G, GUO C L, HE H Y, et al. Study on the classification of groundwater depression cone[J]. Geology and resources, 2019, 28(5): 487-492. (in Chinese))
- [4] 杨会峰,曹文庚,支传顺,等. 近 40 年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1142-1155. (YANG H F, CAO W G, ZHI C S, et al. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1142-1155. (in Chinese))
- [5] 赵伟玲,唐立强,李晓明,等. 河北省地下水水位降落漏斗划分关键问题分析[J]. 中国水利, 2023(23): 34-37. (ZHAO W L, TANG L Q, LI X M,

- [2] 李俊辉,李俊峰,马红兵,等. 基于水安全的溧水流域数字孪生系统应用研究[J]. 水电与新能源, 2024, 38(10): 31-34. (LI J H, LI J F, MA H B, et al. Application of digital twin system in Yunshui River Basin based on water security[J]. Hydropower and new energy, 2024, 38(10): 31-34. (in Chinese))
- [3] 张景帅,胡彩虹. 基于深度学习模型的中小河流洪水模拟[J]. 水电能源科学, 2024, 42(10): 11-15. (ZHANG J S, HU C H. Flood simulation of small and medium-sized rivers based on deep learning model[J]. Water resources and power, 2024, 42(10): 11-15. (in Chinese))
- [4] 胡义明,陈钰,周瑛,等. 基于水文水动力模型和机器学习模型耦合的河道水位预报方法[J]. 水电能源科学, 2024, 42(10): 29-32. (HU Y M, CHEN Y, ZHOU Y, et al. River water level prediction method using hydrodynamic model and machine learning model[J]. Water resources and power, 2024, 42(10): 29-32. (in Chinese))
- [5] 张锦堂,任明磊,李京兵,等. 基于长短时记忆网络的山区中小流域降雨径流模拟[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 33-37. (ZHANG J T, REN M L, LI J B, et al. Rainfall-runoff simulation in the small and medium-sized catchments using the long short-term memory network[J]. Water resources and power, 2024, 42(8): 33-37. (in Chinese))
- *****
et al. Analysis of key issues in delineating groundwater depression cones in Hebei Province[J]. China water resources, 2023(23): 34-37. (in Chinese))
- [6] 南天,曹文庚,任印国,等. 京津冀平原浅层地下水漏斗演变规律与影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 110-121. (NAN T, CAO W G, REN Y G, et al. Evolution and influence factors of shallow groundwater depression cone in Beijing-Tianjin-Hebei Plain[J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2024, 22(1): 110-121. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地下水监测工程技术标准: GB/T 51040-2023[S]. 北京: 中国计划出版社, 2024. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Groundwater monitoring engineering technical standards: GB/T 51040-2023 [S]. Beijing: China Planning Press, 2024. (in Chinese))
- [8] 王浩钰,付国永,李黎,等. 一种基于 Xgboost+GWR 算法的中国地区降水量空间插值模型[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 7-11. (WANG H Y, FU G Y, LI L, et al. A spatial precipitation distribution prediction model for Chinese regions based on Xgboost+GWR algorithm[J]. Water resources and power, 2021, 39(12): 7-11. (in Chinese))
- [9] 李蕾. 基于 EEMD-Xgboost 组合模型的渭北流域月径流序列模拟研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 22-25. (LI L. Simulation of monthly runoff sequences in the Weibei Basin using combined EEMD-xgboost model[J]. Water resources and power, 2022, 40(5): 22-25. (in Chinese))