

基于 EMD-AR 模型的黄河下游灌区地下水漏斗演变预测

刘中培^{a,b}, 齐明坤^a, 韩宇平^{a,b}, 曹润祥^a, 冷静^a

(华北水利水电大学 a.水资源学院;b.河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室,郑州 450046)

摘要:社会经济和农业的不断发展使得人们对地下水需求程度变得愈来愈强,导致开采区出现严重的地下水漏斗,影响当地社会、经济与环境的高质量发展。为探明黄河下游灌区地下水漏斗演变特征,基于人民胜利渠灌区 24 个观测井 64 年的实测数据,通过 ArcGIS 空间插值对整个灌区地下水漏斗的形成、演变特征及年际变化趋势进行分析。采用基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的自回归(Autoregression, AR)模型和普通最小二乘(Ordinary Least Squares, OLS)线性回归模型分别对 2022—2030 年夏庄漏斗的中心水位和面积进行预测。结果表明,整个灌区地下水漏斗中心最先出现在董庄,逐渐过渡形成以夏庄为中心的地下水漏斗,漏斗中心水位在不断下降,面积不断增加。2022—2030 年夏庄漏斗中心水位下降约 1.5 m,面积增加约 8.5 km²。以 2025 年为分界点,2025 年前后漏斗中心水位和面积变化速度不同。2022—2025 年漏斗中心水位下降速度约为 0.08 m/a,漏斗面积增加速度约为 1.4 km²/a,2025—2030 年漏斗中心水位下降速度约为 0.25 m/a,漏斗面积增加速度约为 0.85 km²/a。该研究结果有助于对黄河下游地下水漏斗演变的深层次理解,可为漏斗的治理修复及区域高质量发展提供理论支撑。

关键词:黄河下游;人民胜利渠灌区;地下水漏斗演变;模型预测;趋势分析

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

地下水作为重要的水资源,在维持社会经济发展、生态环境和农业生产需求方面发挥着重要作用^[1]。地下水开采量的不断增大导致地下水漏斗的产生及发展,并在某些地区出现了难以恢复的永久性降落漏斗^[2-4]。地下水漏斗的发展会进一步引发诸如地面沉降、地裂缝、咸水入侵、地下水污染等环境地质问题^[5-6],影响区域生态保护和高质量发展^[7]。目前关于地下水漏斗的研究主要集中在漏斗演变特征及修复等方面,而对地下水漏斗演变趋势的预测研究相对较少^[8-11]。

人民胜利渠灌区位于黄河下游,是河南省重要的粮食生产区,作为重要的灌溉水源,地下水在农业发展中扮演着重要的角色^[12]。长期大量的开采地下水导致灌区地下水位普遍下降,出现了地下水降落漏斗并不断扩展。以往的研究主要集中在水资源管理、利用,以及优化配置等方面,有关灌区地下水漏斗方面的研究较少^[13-15]。本文采用地理空间分析方法识别了人民胜利渠灌区地下水漏斗的形成时间,分析了地下水漏斗的中心水位、面积演变特征^[16-17],构建了地下水漏斗的中心水位模型和面积模型对漏斗中心水位和面积进行预测,从而为实现地下水的科学管理与区域高质量发展提供依据。

1 研究区概况

人民胜利渠灌区(113°31'E~114°25'E,35°0'N~35°30'N)位于黄河北岸,总面积为 1 486.84 km²。灌区

收稿日期:2021-09-24;修回日期:2022-02-21.

基金项目:国家自然科学基金(42072287)

作者简介:刘中培(1983—),男,河南平顶山人,华北水利水电大学副教授,硕士生导师,博士,从事水文地质学方面的研究,E-mail:brightlzp@126.com.

通信作者:曹润祥(1990—),男,河南新乡人,华北水利水电大学讲师,博士,从事水文水资源方面的研究,E-mail:runx.cao@foxmail.com.

属于温带大陆性季风气候,四季分明,春季干旱多沙、夏季炎热多雨、秋季秋高气爽、冬季寒冷干燥,多年平均气温约 14 °C,无霜期 220 d 左右。根据国家气象中心新乡站多年的降水资料,灌区多年平均降水量为 620 mm,年内降水量分配不均,主要集中在 6 至 9 月份,多年平均潜在蒸发量为 1 864 mm。

根据《河南省新乡县区域水文地质调查》成果,研究区地层可分为第三系上新统,以棕红黏土、粉质黏土为主;第四系下更新统,为冰积地层;第四系中更新统,为洪积地层;第四系上更新统下部,为冲积地层;全新统一段为冲积、洪积地层,全新统二段为冲积、洪积、风积地层,全新统三段为沼泽堆积地层。依据含水介质及类型,区域调查深度范围内地下水可划分为松散岩类孔隙水,半胶结碎屑岩类孔隙裂隙水两类。根据含水层埋深条件可分为浅层含水组、中深层含水组和深层含水组。按 5 m 的降深计算又可分为强富水区、中富水区、弱富水区。其中灌区西部关堤一带为强富水区($>3\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$),灌区中部获嘉一带为中富水区($1\ 000\sim 3\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$),灌区北部共产主义渠附近为弱富水区($<1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$)。研究区概况见图 1。

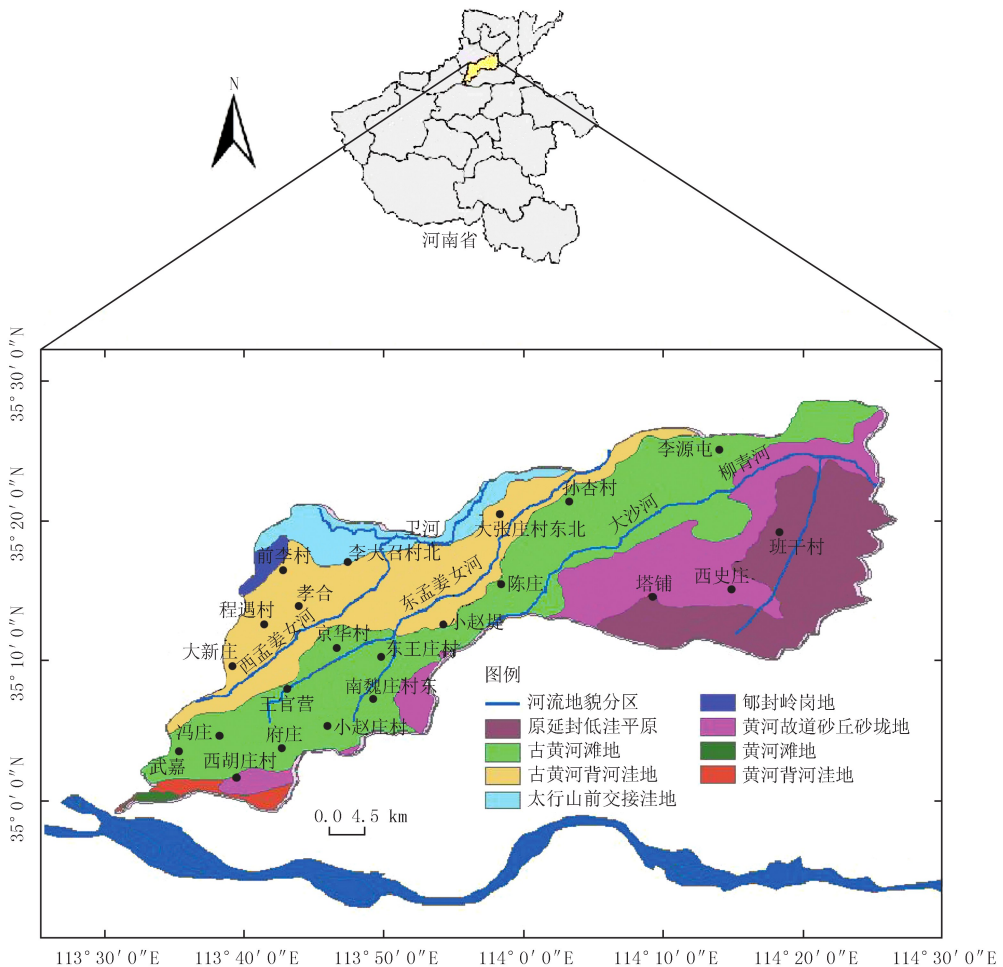


图1 人民胜利渠灌区概况图

Fig.1 Overview of the People's Victory Canal Irrigation Area

2 材料与方法

2.1 数据来源及处理

本文分析对象为浅层地下水,地下水埋深资料来源于河南省人民胜利渠管理局,收集了研究区内 24 个观测井(由于个别观测井经纬度数据缺失,某些年份观测井不到 24 个)1953—2017 年逐月地下水埋深观测数据,地下水水位为观测井地面高程与埋深之差;地下水漏斗面积数据获取首先通过 ArcGIS 软件绘制研究区地下水等水位线图,然后识别地下水漏斗的范围,最后利用空间分析提取数据实现。

本文采用基于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)处理后的数据构建漏斗中心水位

自回归(Autoregression, AR)模型,进行中心水位的预测;结合普通最小二乘(OLS)方法,建立漏斗面积与漏斗中心水位变化的 OLS 回归模型,预测漏斗面积.

2.2 研究方法

2.2.1 基于 EMD 的 AR 模型

EMD 是对一种信号进行平稳化处理,将信号中的不同尺度的波段或趋势项提取出来,从而得到一系列的不同特征尺度的经验模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个余项^[18-19].基于 EMD 的 AR 模型建模步骤具体如下所示.

步骤 1 提取原始时间信号的 IMF 和余项.提取 IMF 过程中,IMF 必须符合两个条件: $I(t)$ 极值的数量(最大值和最小值数量之和)与零穿越的数量必须相等或最多相差 1;在 $I(t)$ 的任意点,局部最大值定义的包络线的平均值和局部最小值定义的包络线的平均值应该等于零,提取过程可以通过“筛选”步骤来完成^[20-21].原始时间序列 $D(t)$ 表示为:

$$D(t) = \sum_i^n I_i(t) + r_n(t), \tag{1}$$

式中: $D(t)$ 表示原始时间序列, r_n 表示最终的余项, I_i 表示不同频率的 IMF.

步骤 2 对所有的经验模态函数 IMF_s 分别建立 AR 模型^[22-23].AR 模型计算流程如图 2 所示,模型数学表达式为:

$$I_{i,j} = \mu + \varphi_1(I_{i,j-1} - \mu) + \varphi_2(I_{i,j-2} - \mu) + \dots + \varphi_p(I_{i,j-p} - \mu) + \epsilon_t, \tag{2}$$

式中: $I_{i,j}$ 为第 i 个 IMF 第 j 时刻序列值, μ 为序列均值, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 为自回归系数, ϵ_t 为白噪声项.

2.2.2 平稳性及白噪声性检验

AR 模型要求时间序列是平稳的非白噪声序列,因此需对 EMD 分解的各经验模态函数 IMF_s 先进行平稳性检验再进行白噪声性检验.数据的平稳性采用单位根来进行检验,若不存在单位根,则时间序列平稳,若存在单位根,则时间序列不平稳^[24].对于不平稳的时间序列采用差分处理,直到时间序列平稳,通过单位根检验^[24-25].序列的白噪声性检验采用 Ljung-Box Q 检验的方法,用以检验时间序列是否存在自相关,若时间序列存在自相关,则序列为非白噪声性序列,否则为白噪声性序列^[26].上述检验过程均由 Eviews 专业统计学软件完成.

2.2.3 模型阶数和参数估计

模型阶数的确定是模型参数($\varphi_i, \mu, \epsilon_t$)估计的前提条件,此外模型适用性检验的核心就是解决模型的定阶问题.本文采用赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)确定 AR 模型阶数^[27].

$$AIC(p) = N \ln \sigma_a^2 + 2p, \tag{3}$$

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N a_t^2, \tag{4}$$

式中: $AIC(p)$ 表示模型阶数为 p 时的赤池信息准则值, N 为序列长度, p 为模型的阶次, σ_a^2 为残差 a_t 的二阶原点矩.参数估计就是在给定模型阶次的情况下,利用最小二乘法估计出模型的参数,当 $AIC(p)$ 取得最小值时的阶数为模型的最佳阶数,此时的模型参数为最终确定参数.

2.2.4 模型的诊断与修正

对各经验模态函数 IMF_s 建立的 AR 模型进行残差序列相关检验和残差异方差检验,通过一系列检验来验证模型的准确性.对没有通过检验的模型进行修正,使其通过检验,以实现模型的应用.本文采用拉格朗日乘数检验(Lagrange Multiplier Test, LMT)对残差序列相关性进行检验,采用怀特检验(White Test, WT)对残差异方差进行检验^[28].

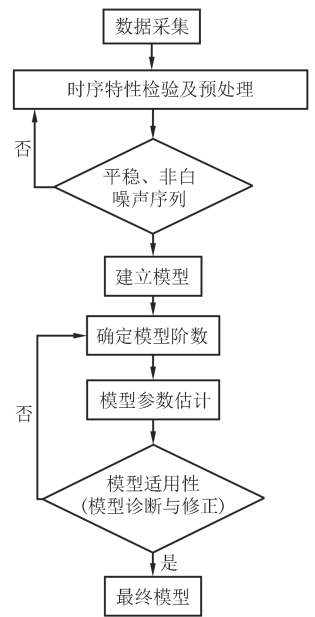


图2 AR模型计算流程图

Fig. 2 AR Model technology roadmap

2.2.5 OLS 回归模型

本文使用 OLS 分析漏斗面积与中心水位的关系^[29].在地下水漏斗演变过程中,漏斗中心水位和漏斗面积关联性较大,通过夏庄漏斗处的中心水位和漏斗面积的相关分析,二者呈现高度相关,且二次函数拟合时 R^2 值最大,拟合程度最好.建立二者的回归方程,数学表达式为:

$$Y/m^2 = c + b(X/m) + a(X/m)^2, \tag{5}$$

式中: Y 为因变量(漏斗面积), X 为自变量(中心水位), c 为常数, a, b 分别为一次项和二次项系数.

3 结果与分析

3.1 地下水漏斗演变分析

3.1.1 漏斗形成及发展

为分析研究区内地下水漏斗的产生时间及演变特征,根据 1953—2017 年地下水埋深数据,利用 Arc-GIS 地统计学模块克里金(Kriging)插值法对地下水水位进行空间插值,并绘制每年的地下水水位等值线图,地下水水位变化明显的年份地下水水位情况如图 3 所示.

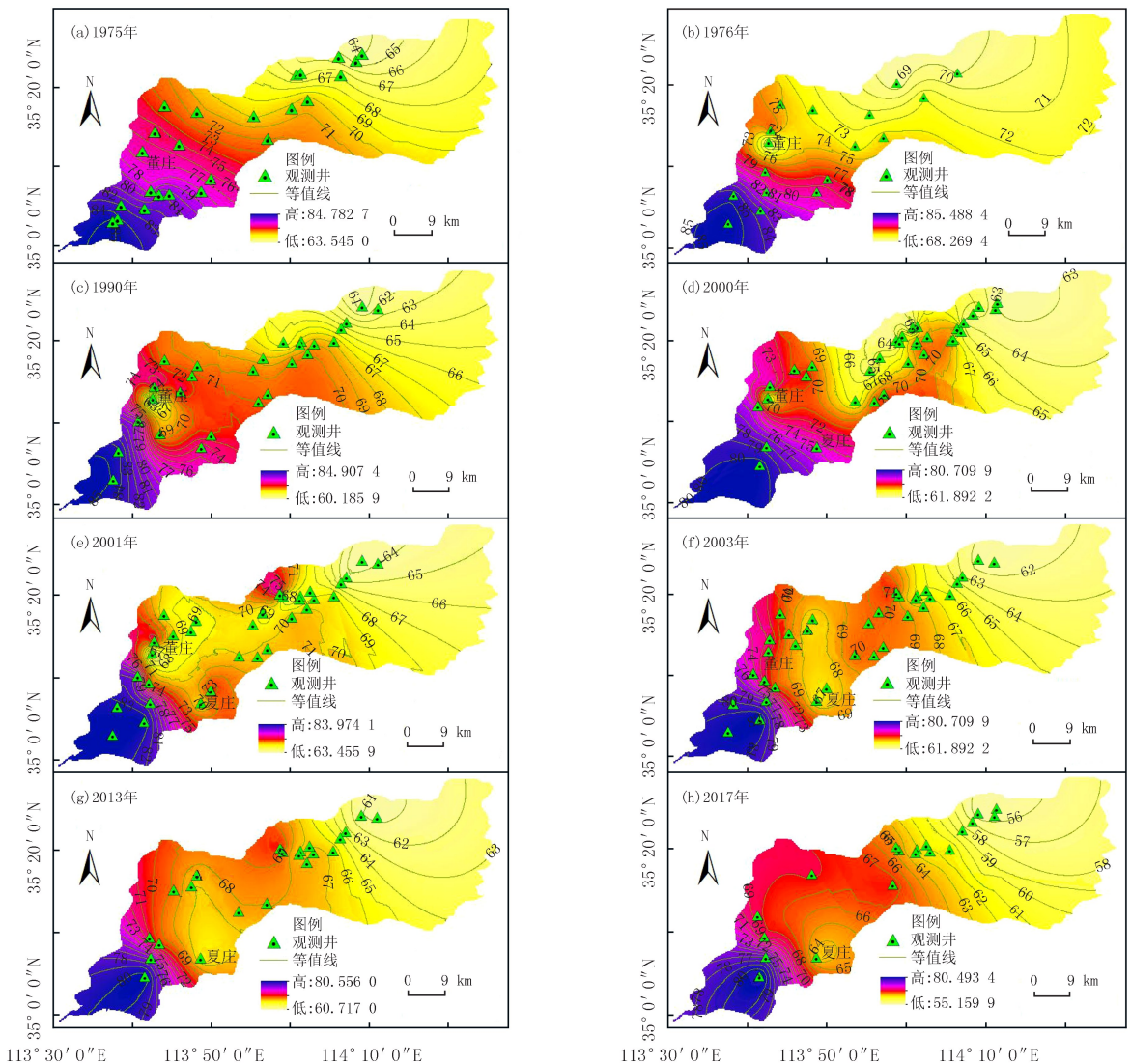


图3 灌区地下水水位等值线图

Fig.3 Contour map of groundwater level in irrigation area

由图 3(a)和图 3(b)对比可知,1975 年以前灌区未出现地下水降落漏斗(图 3(a)),1976 年在灌区的中部形成以董庄为中心的地下水降落漏斗,但地下水漏斗范围较小(图 3(b)),随后漏斗面积逐渐扩大,1990 年董庄漏斗面积达到最大,如图 3(c)所示.图 3(d)和图 3(e)对比发现,2000 年漏斗中心仍然在董庄(图 3(d)),与 1990 年相比只是漏斗面积有所变化,而至 2001 年,以夏庄为中心的地下水漏斗开始逐渐形成,但此时董庄漏斗和夏庄漏斗基本相对独立,未形成统一的漏斗(图 3(e)).至 2003 年,随着地下水位的持续下降,董庄漏斗和夏庄漏斗连通,形成了一个面积更大的地下水降落漏斗(图 3(f)).图 3(g)和图 3(h)表明,随着时间的推移,降落漏斗中心逐渐转移至夏庄附近,并且漏斗面积持续扩大至研究区外围.

综上所述,研究区地下水漏斗演变大致经历了三个阶段.第一个阶段为 1975 年以前,灌区未出现明显的地下水降落漏斗,地下水位等值线分布相对均匀,地下水由灌区西南向东北方向流动.第二个阶段为 1975—2000 年,地下水漏斗开始出现,此阶段地下水漏斗中心在董庄附近.当地下水漏斗出现后,地下水流场发生了明显变化,形成了以地下水漏斗为中心的局部地下水流动系统.灌区地下水位等值线变得疏密不一,漏斗区等值线密集,水力梯度大,非漏斗区等值线稀疏,水力梯度相对较小.第三阶段为 2001 年至现在,随着地下水位的持续下降,漏斗面积逐渐增加,董庄漏斗和夏庄漏斗连通,逐渐形成了以夏庄为中心的更大的地下水降落漏斗,至 2017 年漏斗边界已扩展至研究区外围.

3.1.2 漏斗中心水位及面积演变

漏斗中心水位及面积是衡量漏斗发展的重要表征,地下水降落漏斗中心及其水位变化反映了漏斗的位置及垂向演变特征;漏斗面积反映了地下水降落漏斗水平发展特征.研究区地下水漏斗演变特征如图 4 所示.

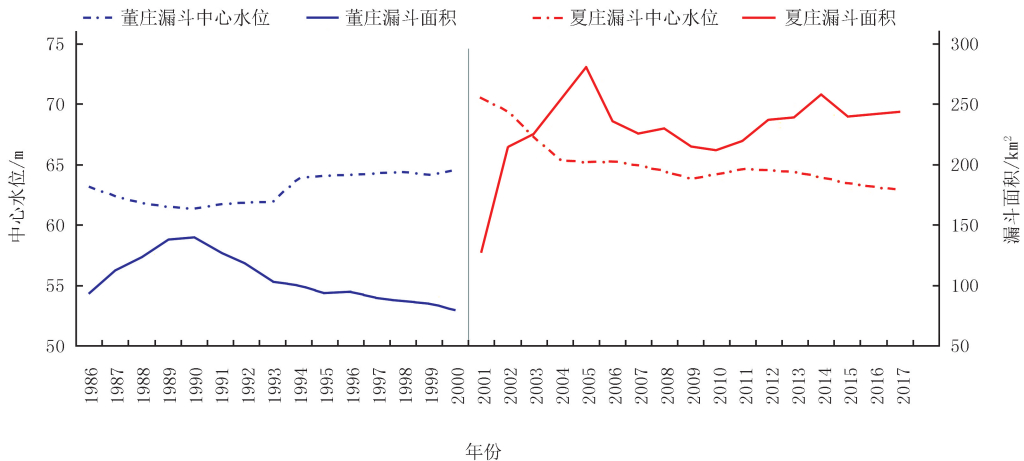


图4 漏斗中心水位及面积年际变化图

Fig.4 Inter-annual changes in the water level and area of the depression cone

由图 3 和图 4 可知,1990 年之前,董庄地下水水位不断下降,地下水漏斗面积逐年变大.1990 年之后,漏斗中心水位逐年恢复,漏斗面积逐渐变小,整个变化过程较为平缓.1990—2000 年董庄漏斗中心水位上涨约 2 m,漏斗面积减小了约 60 km².2001 年漏斗中心转移至夏庄,形成以夏庄为中心的地下水降落漏斗.与董庄相比,夏庄漏斗中心水位与漏斗面积的变化情况大致为两个阶段.2001—2005 年二者变化幅度较大,漏斗中心水位下降了约 5 m,漏斗面积增加了 150 km².2006—2017 年二者变化幅度明显变小,漏斗中心水位下降了约 2 m,面积增加了约 5 km².

综上所述,董庄漏斗变化过程与夏庄漏斗变化过程有所不同,董庄漏斗中心水位先下降后上升,面积先增大后减小,两者变化幅度相对较小,总体呈现负相关关系.夏庄漏斗中心水位和漏斗面积演变经历两个阶段,第一个阶段为 2001—2005 年,变化明显,水位迅速下降,面积快速增加;第二阶段为 2005 年之后,两者变化相对平稳,总体呈现明显负相关关系.

3.2 地下水漏斗模型构建及预测

3.2.1 漏斗中心水位及面积模型构建

(1)漏斗中心水位预测模型构建

选取 1953—2017 年夏庄漏斗中心处的水位数据,利用 EMD 方法,将漏斗中心水位数据分解成 4 个经验模态函数 IMF_s,分解结果如图 5 所示.人民胜利渠灌区的地下水位变化过程是非平稳、非线性的,是由多种波动成分共同作用的结果,从中可以提取出 4 种不同波段的经验模态分量 IMF 和一个残余项:IMF1 波动周期不明显,波动幅度变化比较大;IMF2 波动周期与 IMF1 相比变化明显,波动周期为准 10 a,波动幅度变化小;IMF3 波动周期相比于 IMF2 变大,波动周期为准 15 a,波动幅度小于 0.5 m;IMF4 波动周期最长,波动周期为准 27 a,波动幅度在 1983 年以前变化最小,1983 年后变化最大;残余项表明漏斗中心水位呈现逐年下降趋势.

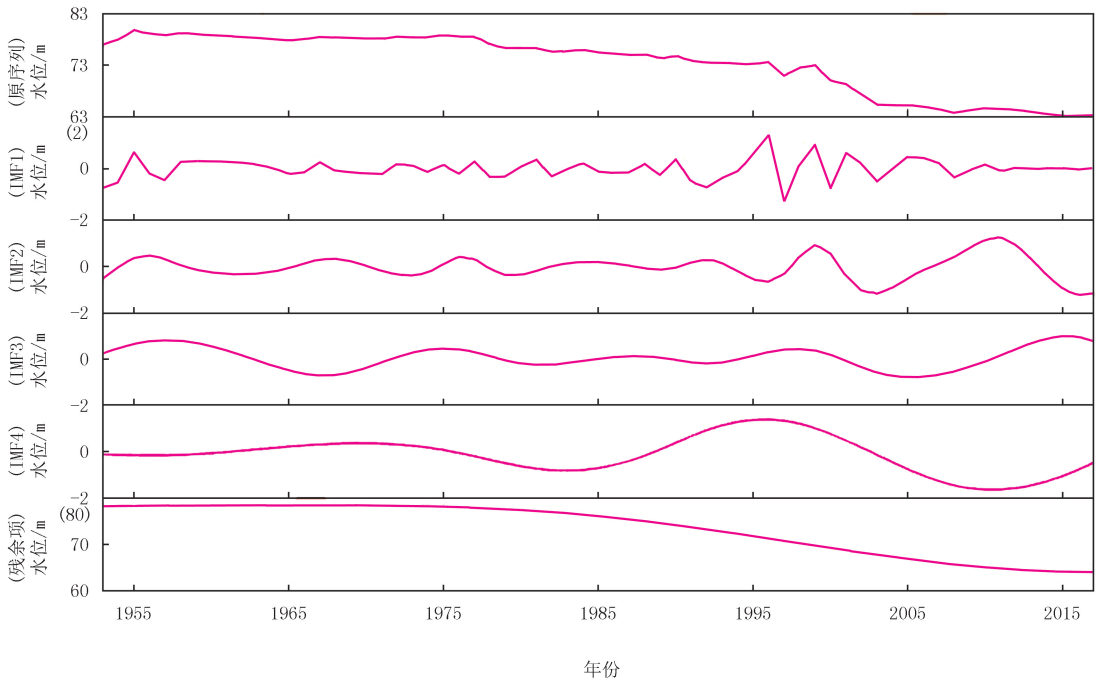


图5 EMD分解图

Fig.5 EMD exploded view

对 4 个经验模态函数 IMF_s 进行检验,检验结果均为平稳的非白噪声序列.由 AIC 准则确定 IMF1, IMF2, IMF3, IMF4 的 AR 模型分别为 AR(2), AR(4), AR(6), AR(6).AR 模型参数计算结果见表 1.

表 1 AR 模型参数计算

Tab. 1 AR model parameter calculation

模型参数	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	模型参数	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4
μ	-0.002	-0.048	0.071	-0.143	φ_3		2.046	5.019	7.607
σ	0.399	0.517	0.479	0.778	φ_4		-0.715	-2.755	-4.905
c	0.018	-0.011	0	0	φ_5			0.984	1.973
φ_1	-0.255	2.483	3.619	4.164	φ_6			-0.204	-0.387
φ_2	-0.321	-3.076	-5.697	-7.457					

采用拉格朗日乘数检验 LMT,怀特检验 WT,分别对残差序列进行相关性和异方差检验^[30],结果表明各经验模态函数 IMF_s 的 AR 模型均通过检验.

选取 1953—2002 年作为模型率定期,2003—2017 年作为模型验证期,模拟预测结果由表 2 可知,模拟预测结果与实际观测结果拟合程度较好,相对误差均小于 5%,模型精度高,模拟效果理想,可利用此模型对

未来年份漏斗中心水位进行预测.

表 2 地下水位模拟预测结果误差分析

Tab. 2 Error analysis of groundwater level simulation prediction results

年份	实测值/m	模拟值/m	绝对误差/m	相对误差/%	年份	实测值/m	模拟值/m	绝对误差/m	相对误差/%
2003	65.41	64.28	-1.13	-1.75	2011	64.54	65.19	0.65	1.01
2004	65.24	64.38	-0.86	-1.31	2012	64.45	65.25	0.80	1.24
2005	65.32	64.47	-0.85	-1.30	2013	63.96	65.30	1.34	2.10
2006	64.95	64.55	-0.40	-0.62	2014	63.52	65.34	1.82	2.87
2007	64.50	64.64	0.14	0.22	2015	63.16	65.37	2.21	3.50
2008	63.83	64.96	1.13	1.77	2016	63.01	65.39	2.38	3.78
2009	64.24	65.04	0.80	1.25	2017	63.23	65.40	2.17	3.43
2010	64.70	65.12	0.42	0.65					

(2)漏斗面积预测模型构建

根据 2001—2017 年夏庄漏斗中心水位和漏斗面积数据,利用 SPSS 软件的 OLS 回归分析模块对中心水位和面积进行分析.通过计算确定了回归系数及模型相应参数,再通过比选,得到了地下水漏斗面积的回归方程.模型相应参数见表 3.

表 3 模型参数汇总

Tab. 3 Summary of model parameters

方程	模型汇总					参数估计值		
	R ²	F	df1	df2	Sig.	常数	b	a
线性	0.849	101.597	1	18	0.000	1 221.040	-15.234	-
对数	0.846	99.215	1	18	0.000	4 586.563	1 043.500	-
二次	0.861	52.867	2	17	0.000	-3 234.814	114.865	-0.947

注:因变量为漏斗面积;自变量为中心水位.

从表 3 中看出,二次函数建立回归模型时的 R² 值最大,为 0.861,拟合程度最好,因此夏庄漏斗中心水位和漏斗面积回归模型如(6)式所示:

$$Y/m^2 = -3 234.814 + 114.865(X/m) - 0.947(X/m)^2, \tag{6}$$

式中:Y 为漏斗面积,X 为中心水位.

3.2.2 漏斗中心水位及面积预测

利用 EMD-AR 模型对夏庄 2022—2030 年漏斗中心水位进行预测,预测结果如图 6(漏斗中心水位曲线)所示,2022—2030 年漏斗中心水位下降约 1.5 m,水位下降过程分为两个阶段.第一阶段为 2025 年以前,漏斗中心水位约以 0.08 m/a 速度缓慢下降.第二阶段为 2025 年以后,漏斗中心水位约以每年 0.25 m/a 速度下降.

基于水位预测结果,根据漏斗中心水位和漏斗面积回归模型对漏斗面积进行预测,预测结果如图 6(漏斗面积柱状图)所示,2022—2030 年漏斗面积增加约 8.5 km²,面积增加过程可分为两个阶段.第一阶段为 2025 年以前,漏斗面积约以 1.4 km²/a 速度增加,增长速度较快.第二阶段为 2025 年以后,漏斗面积约以 0.85 km²/a 速度增加,增长速度较为缓慢.

计算结果表明,在现有条件下,灌区漏斗中心水位持续下降,漏斗面积进一步扩大,亟须采取压采措施控制漏斗的发展.

需要指出的是,本文使用的 EMD-AR 方法明显的优点是所需资料相对不多(主要为长系列水位数据和漏斗形成后的面积数据),目的是利用 EMD 对时间序列平稳化处理后的本征模函数 IMF 自身序列实现对未来情况的预测,是根据数据发展趋势进行的预测,属于统计模型的范畴,如果坡度、坡向、地面植被、开采政策等地下水影响因子不发生突变的话,数据系列具有一致性,用此方法预测效果较好.

4 结 论

(1)1976年以前,灌区地下水水流场未发生较大变化,未出现地下水漏斗.1976年以后,灌区地下水水流场开始发生改变,地下水漏斗最早出现在董庄,而后由董庄过渡,最终形成以夏庄为中心的地下水降落漏斗.在漏斗形成中,漏斗中心处的水位和漏斗面积在不断扩大,中心水位与漏斗面积变化呈现高度相关.

(2)2022—2030年夏庄地下水漏斗中心处水位持续下降.以2025年为分界点,2022—2025年漏斗中心水位下降缓慢,下降速度约为0.08 m/a;2025—2030年漏斗中心水位下降迅速,下降速度约为0.25 m/a.2022—2030年夏庄地下水漏斗中心水位下降约1.5 m.

(3)随着漏斗中心水位的降低,漏斗面积也不断扩大.2022—2025年漏斗面积增长较快,增长速度约为1.4 km²/a;2025—2030年漏斗面积增长缓慢,增长速度约为0.85 km²/a.2022—2030年夏庄漏斗面积增长约8.5 km².

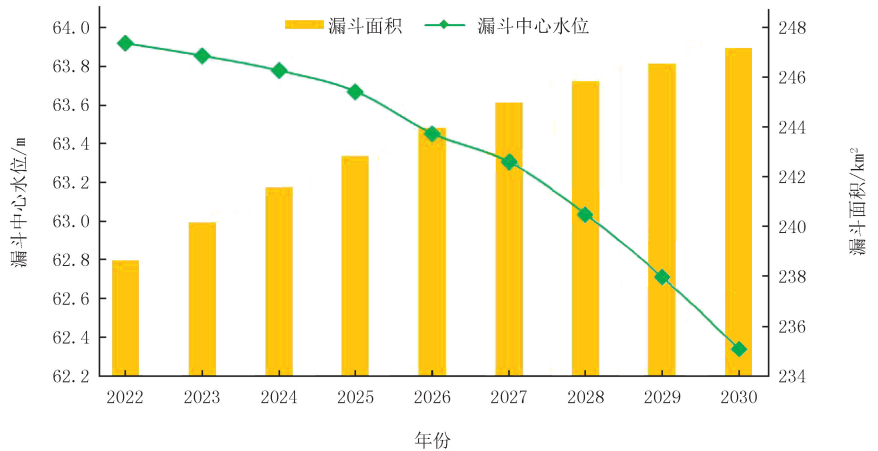


图6 漏斗中心水位及面积预测分析图

Fig.6 The water level and area prediction analysis diagram of the depression cone

参 考 文 献

- [1] 杨柳.陕西省泾惠渠灌区发展中的生态环境问题分析及调控研究[D].西安:西安理工大学,2017.
YANG L.Ecological environment problems analysis and regulation study in the development of jinghui canal irrigation district in Shaanxi Province[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2017.
- [2] 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.
- [3] 李法金,荣倩,曲士松,等.平原漏斗区高效生态含水层补给技术研究[J].水利水电技术,2016,47(11):153-157.
LI F J, RONG Q, QU S S, et al. Study on technology of high efficient eco-recharge of aquifer in plain area of groundwater depression cone [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(11):153-157.
- [4] 武鑫,黄敬军,缪世贤,等.徐州城市供水源地降落漏斗演变及成因分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):151-157.
WU X, HUANG J J, MIAO S X, et al. Analysis of evolution characteristics and formation mechanism of groundwater depression cone in water supply source area of Xuzhou City[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(3):151-157.
- [5] 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(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(4):1142-1155.
- [6] 黄多成,王守沛.亳州市城市环境地质问题及防治对策浅析[J].地下水,2020,42(4):126-128.
HUANG D C, WANG S P. A brief analysis of Bozhou City environmental geological problems and countermeasures[J]. Ground Water, 2020, 42(4):126-128.
- [7] 魏杰,刘丽娜,马云霞,等.黄河中下游河南省高质量发展与生态环境耦合协调度时空格局研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(2):48-57.
WEI J, LIU L N, MA Y X, et al. Research on the temporal and spatial pattern of the coupling coordination degree between high-quality development and ecological environment in Henan Province in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2022, 50(2):48-57.
- [8] 侯军亮,李辉.廊坊城区地面沉降与地下水漏斗响应关系[J].科学技术与工程,2020,20(14):5530-5535.

- HOU J L, LI H. Study on the response relationship between the groundwater funnel and the land subsidence in Langfang urban area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5530-5535.
- [9] 羊艳, 唐世南, 于丽丽. 地下水超采综合治理与修复模式研究[J]. 水利规划与设计, 2021(12): 92-96.
YANG Y, TANG S N, YU L L. Research on comprehensive management and restoration mode of groundwater overexploitation[J]. Water Resources Planning and Design, 2021(12): 92-96.
- [10] 赵琳琳. 辽阳西部平原地下水可恢复性浅析[J]. 水利技术监督, 2020, 28(2): 200-202.
ZHAO L L. Analysis of groundwater recoverability in the western plain of Liaoyang[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2020, 28(2): 200-202.
- [11] 高亚威. 辽阳平原区地下水漏斗特征及人工回灌研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 91-96.
GAO Y W. Characteristics of groundwater depression and artificial recharge in Liaozhong plain[J]. Yellow River, 2020, 42(5): 91-96.
- [12] 张嘉星, 齐学斌, MAGZUM NUROLLA, 等. 人民胜利渠灌区适宜井渠用水比研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 58-63.
ZHANG J X, QI X B, MAGZUM N, et al. Appropriate well-canal irrigation proportion in irrigation district based on MODFLOW and GIS[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(2): 58-63.
- [13] 胡艳玲, 黄仲冬, 齐学斌, 等. 基于线性规划和 MODFLOW 耦合技术的人民胜利渠灌区水资源优化配置研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 85-92.
HU Y L, HUANG Z D, QI X B, et al. Study on optimal allocation of water resources in irrigation district based on linear programming and MODFLOW coupling technology[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 85-92.
- [14] 李子阳, 马福恒, 李涵曼, 等. 人民胜利渠灌区智慧管理平台的物联网架构[J]. 中国农村水利水电, 2019(6): 88-92.
LI Z Y, MA F H, LI H M, et al. Architecture of intelligent management platform for People's victory canal with Internet of Things[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(6): 88-92.
- [15] 闫旖君, 徐建新, 陆建红. 人民胜利渠灌区多水源循环转化模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 52-57.
YAN Y J, XU J X, LU J H. Research on the multi-water cycle and transformation model in the People's victory canal irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(2): 52-57.
- [16] 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 J, HAO X M, FAN L L, et al. Spatial variability of groundwater level in midstream oasis of Heihe River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(11): 106-115.
- [17] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报, 2013(9): 87-90.
LI J X, LI C K, YIN Z H. ArcGIS based kriging interpolation method and its application[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(9): 87-90.
- [18] WU W H, CHEN C C, JHOU J W, et al. A rapidly convergent empirical mode decomposition method for analyzing the environmental temperature effects on stay cable force[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33(8): 672-690.
- [19] 马宇红, 强亚蓉, 杨梅. 一种基于经验模态分解的时间序列预测方法[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(1): 27-34.
MA Y H, QIANG Y R, YANG M. A time series prediction method based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Northwest Normal University(Natural Science), 2020, 56(1): 27-34.
- [20] 王俊鸿, 覃光华, 童旭. 基于 EMD 的岷江上中游流域流量特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 38-42.
WANG J H, QIN G H, TONG X. An analysis of flow characteristics of upper and middle reaches of Minjiang River based on EMD[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(5): 38-42.
- [21] 王笑蕾, 张勤, 张双成. 基于 EMD 和 WD 联合算法的 GPS 水汽时间序列的周期性振荡分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(4): 620-628.
WANG X L, ZHANG Q, ZHANG S C. Periodic oscillation analysis of GPS water vapor time series using combined algorithm based on EMD and WD[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(4): 620-628.
- [22] 李福兴, 陈伏龙, 蔡文静, 等. 基于 EMD 组合模型的径流多尺度预测[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 428-437.
LI F X, CHEN F L, CAI W J, et al. Multiscale runoff prediction based on the EMD combined model[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 428-437.
- [23] 练继建, 孙萧仲, 马超, 等. 基于 EEMD-AR 模型的丹江口水库年径流随机模拟与预报[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 16-21.
LIAN J J, SUN X Z, MA C, et al. Stochastic simulation and prediction of annual runoff in the Danjiangkou Reservoir based on EEMD-AR model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5): 16-21.
- [24] 李艺珍, 岳春芳. 金沟河流域径流极值时间序列平稳性检验[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 21-24.
LI Y Z, YUE C F. Stability test of runoff extreme time series in Jingou River Basin[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(10): 21-24.
- [25] 刘罗曼. 时间序列平稳性检验[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2010, 28(3): 357-359.
LIU L M. Checking of time series stationarity[J]. Journal of Shenyang Normal University(Natural Science Edition), 2010, 28(3): 357-359.
- [26] 田应福, 姜晴琼. 时间序列分析的一个重要问题及其解决方法[J]. 统计与决策, 2015(6): 87-88.

- TIAN Y F,JIANG Q Q.An important problem of time series analysis and its solution[J].Statistics & Decision,2015(6):87-88.
- [27] 王元超.丹江口水库中长期径流预报及水质水量联合模拟技术[D].北京:中国水利水电科学研究院,2015.
- WANG Y C.Medium and long term runoff forecasting and joint simulation of water quality and quantity for Danjiangkou reservoir[D]. Beijing:China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2015.
- [28] 乔舰.DF 单位根检验的拓展与应用[J].统计与决策,2021,37(3):45-49.
- QIAO J.Extension and application of DF unit root test[J].Statistics & Decision,2021,37(3):45-49.
- [29] 陈强,朱慧敏,何溶,等.基于地理加权回归模型评估土地利用对地表水质的影响[J].环境科学学报,2015,35(5):1571-1580.
- CHEN Q,ZHU H M,HE R,et al.Evaluating the impacts of land use on surface water quality using geographically weighted regression [J].Acta Scientiae Circumstantiae,2015,35(5):1571-1580.
- [30] 陈晖,杨乃军.异方差的检验比较和修正[J].高师理科学刊,2007,27(3):27-29.
- CHEN H,YANG N J.Heteroscedasticity examination comparison and revision[J].Journal of Science of Teachers' College and University, 2007,27(3):27-29.

Prediction of groundwater depression cone based on EMD-AR model in the irrigation area of the lower Yellow River

Liu Zhongpei^{a,b}, Qi Mingkun^a, Han Yuping^{a,b}, Cao Runxiang^a, Leng Jing^a

(a. College of Water Resources; b. Henan Key Laboratory of Water Resources Conservation and Intensive Utilization in the Yellow River Basin, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The continuous development of social economy and agriculture has made people's demand for groundwater stronger, resulting in serious groundwater depression cone in mining areas, affecting the high-quality development of local society, economy and environment. In order to explore the evolution characteristics of the groundwater depression cone in the irrigation area of the lower Yellow River, based on the 64-year measured data of 24 observation wells in the irrigation area of the People's Shengli Canal, the formation, evolution characteristics and inter-annual change trend of the groundwater depression cone in the irrigation area were analyzed through ArcGIS spatial interpolation. The Autoregressive(AR) model and the least square linear(OLS)regression model based on empirical mode decomposition(EMD)were used to predict the central water level and area of the Xiazhuang depression cone from 2022 to 2030, respectively. The results showed that the center of the groundwater depression cone in the entire irrigation area appeared in Dongzhuang, then transitioned, and finally formed a groundwater depression cone centered on Xiazhuang. The water level at the center of the depression cone is declining and the area is increasing. From 2022 to 2030, the central water level of the Xiazhuang depression cone will drop by about 1.5 m and the area increased by about 8.5 km². From 2022—2025, the central water level decline rate is about 0.08 m/a, and the area increase rate is about 1.4 km²/a; the central water level decline rate from 2025 to 2030 is about 0.25 m/a, and the area increase rate is about 0.85 km²/a. The research results can help people have a further understanding of the evolution of the depression cone in the lower Yellow River and provide a theoretical basis for the governance and repair of the depression cone and regional high-quality development.

Keywords: the lower Yellow River; the People's Shengli Canal irrigation area; evolution of groundwater depression cone; model prediction; trend analysis

[责任编辑 赵晓华 陈留院]