

基于 Holt-Winters 模型的济南泉域地下水资源保护研究

张郑贤¹, 刘 艺¹, 张锋贤²

1. 济南大学 水利与环境学院, 济南 250022

2. 中国科学技术大学 工程科学学院, 合肥 230026

摘要: 以济南名泉趵突泉历年的地下水位为研究对象, 对 2012 年 5 月至 2017 年 11 月趵突泉地下水位波动规律进行分析, 评价保泉形势, 探索保泉供水的有效措施。通过模型的比选, 最终确定利用 Holt-Winters 指数平滑加法模型, 从时间序列的角度分析预测趵突泉地下水位的变化趋势, 并计算出了模型的拟合优度指标和拟合统计量。决定系数 R^2 值为 0.897, 平稳的 R^2 值为 0.627, 数值均较大且其余各项拟合优度指标均较好, 说明模型的拟合效果整体精度较高。利用模型对 2018 年趵突泉的地下水位进行了预测并给出了预测值 95% 的置信区间, 预测年平均水位为 27.814 m, 泉水位波动的峰值为 28.291 m、谷值为 27.329 m 且谷值将出现于 2018 年的 6 月份, 为近 6 年来的最低水位值, 低于 27.6 m 的保泉红色警戒线, 接近 27.01 m 的泉水停喷线。预测结果表明: 2018 年趵突泉将存在潜在停喷的危机, 济南市的保泉任务依然严峻。为争取泉水持续喷涌, 在此基础上提出了科学保泉建议和节水保泉措施, 为济南市评判、预测、调整水系及地下水开采布局提供科学依据。

关键词: 济南; 趵突泉; 地下水位; Holt-Winters 指数平滑模型; 保泉

Study on groundwater resources protection in Jinan spring area based on Holt-Winters Model

ZHANG Zhengxian¹, LIU Yi¹, ZHANG Fengxian²

1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China

2. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Background, aim, and scope In this paper, the fluctuation law of groundwater table of Baotu Spring in Jinan spring area from May 2012 to November 2017 is analyzed. By analyzing and evaluating the situation of protecting spring water, exploring effective measures for protecting spring water area and supplying water for downtown Jinan. **Materials and methods** Based on the Holt-Winters exponential smoothing model, the Holt-Winters addition model is used to analyze and forecast the trend of the groundwater table in the Baotu Spring from a new evaluation index and perspective. And the goodness of fit index and the fitted statistics of the model were calculated. **Results** The coefficient of determination R^2 is 0.897, the stationary R^2 is 0.627. The calculated values

收稿日期: 2017-12-13; 录用日期: 2018-02-28

Received Date: 2017-12-13; Accepted Date: 2018-02-28

通信作者: 刘 艺, E-mail: liuyi426419038@126.com

Corresponding Author: LIU Yi, E-mail: liuyi426419038@126.com

引用格式: 张郑贤, 刘 艺, 张锋贤. 2018. 基于 Holt-Winters 模型的济南泉域地下水资源保护研究 [J]. 地球环境学报, 9(3): 257-265.

Citation: Zhang Z X, Liu Y, Zhang F X. 2018. Study on groundwater resources protection in Jinan spring area based on Holt-Winters Model [J]. Journal of Earth Environment, 9(3): 257-265.

are larger and the other indexes of the goodness of fit are all good, indicating that the model fitting effect is better overall accuracy. **Discussion** By using the model, the water table of Baotu Spring in 2018 is predicted and the confidence interval of 95% of the predicted value is given. The predicted average annual water table is 27.814 m, the spring water table fluctuates at a peak of 28.291 m, the trough is 27.329 m and the trough will appear in June 2018, the lowest water table for the last 6 years. This value is lower than the 27.6 m spring red cordon and close to the 27.01 m spring water spray line. **Conclusions** The forecast results show that there will be a potential crisis in Baotu Spring in 2018, and the task of spring preservation in Jinan will remain harsh. **Recommendations and perspectives** In order to strive for the continued spewing of spring water, the proposal of scientific spring preservation and the measures of saving water and keeping spring have been put forward. It will provide a scientific basis for Jinan City to judge, predict and adjust the layout of the water system and groundwater.

Key words: Jinan; Baotu Spring; groundwater table; Holt-Winters exponential smoothing model; spring protection

济南市素有“泉水甲天下”的美誉，辖区内分布有 640 多处名泉，历史上最著名的名泉有 72 处，其中尤以趵突泉最负盛名。而今被誉为“天下第一泉”的趵突泉由于地下水的不合理开采和城市化的快速发展，使得泉水位与自由出流量受到明显的影响。大量集中开采地下水，加之气象因素的影响，破坏了地下水的自然平衡状态，使泉水分布区地下水位处于持续下降状态，造成水位标高低于泉水出流标高，出现泉水停喷断流的现象（蔡五田等，2013）。为了保持济南泉水常年持续喷涌，满足济南市区城市用水需求，许多学者对济南地区进行了大量的水文地质工作，针对济南泉水保护工程建立了水文地质模型，为济南市水生态文明建设及地下水资源保护提供了重要的科学依据。

随着保泉工作陆续开展，高宗军等（2014）采用微量元素水文地球化学方法，对济南泉域范围内的枯丰水期岩溶水化学特征及其变化进行了研究。牛景涛等（2004）先后在济南市实施了两次回灌补源试验和济西抽水试验，确定了回灌补源与抽水试验影响效果，提出了市区泉水来源，市区与西郊同属济南泉域，减少西郊开采量及实施玉符河回灌补源工程等观点。并指出济南当地水资源匮乏，单纯依靠当地水回灌，不能解决常年保泉问题，建议调引南水北调长江水作为回灌补源水源。本文借鉴已有的研究经验，结合济南泉域趵突泉岩溶水补给区的地形、地貌和水文地质特征，利用 Holt-Winters 指数平滑模型对趵突泉历年的水位数据进行统计分析，从保泉供水、地下水生态维护的角度出发，进行模拟、预测并提出有效的节水保泉措施。

1 研究区概况

济南市位于山东省中部，是山东省的省会，多年平均降水量为 647.9 mm，在 6—9 月集中降水，大气降水是济南地下水最主要的补给来源，降水量的多少直接决定研究区域地下水的总量（祁晓凡等，2012）。岩溶泉域位于济南中部，东至东郊、港沟、西营一线，西部以长清、马山一线为界，北部在市区以北以黄河为界，南到泰山山脉地表分水岭，处于鲁中山地的北缘和山前倾斜平原的交接部位，地势南高北低、东高西低，泉域总面积 1500 km²，济南市区泉域的趵突泉泉水从地下石灰岩溶洞中涌出，其最大涌量达到 240000 m³·d⁻¹，出露标高可达 26.49 m，位居济南“七十二名泉”之首（冷爱国和刘福臣，2011）。济南泉域范围及趵突泉位置见图 1。

2 研究方法

2.1 Holt-Winters 指数平滑模型简介

指数平滑法是布朗（Robert G. Brown）所提出，是在移动平均法基础上发展起来的一种时间序列分析预测法，它是通过计算指数平滑值，配合一定的时间序列预测模型对现象的未来进行预测（Veiga et al, 2014）。Holt-Winters 模型本质上是一种高级的指数平滑模型，适合分析、处理、预测存在某种趋势或受季节影响的序列（Wu et al, 2017）。已有的研究表明，Holt-Winters 模型对基于近期观测值的中、短期预测效果较好，此外，地下水位波动成因复杂，水位预测值对近期观测值的依赖性更强，受近期水位波动的影响更大，综合以上两点，本文选取了济南泉域趵突泉近 5 年的地下水位进行分析，并建立三种不同

的 Holt-Winters 指数平滑模型对趵突泉的水位进行拟合, 通过比较三种模型的拟合结果, 选择最

优的 Holt-Winters 模型对济南泉域的地下水位进行预测。

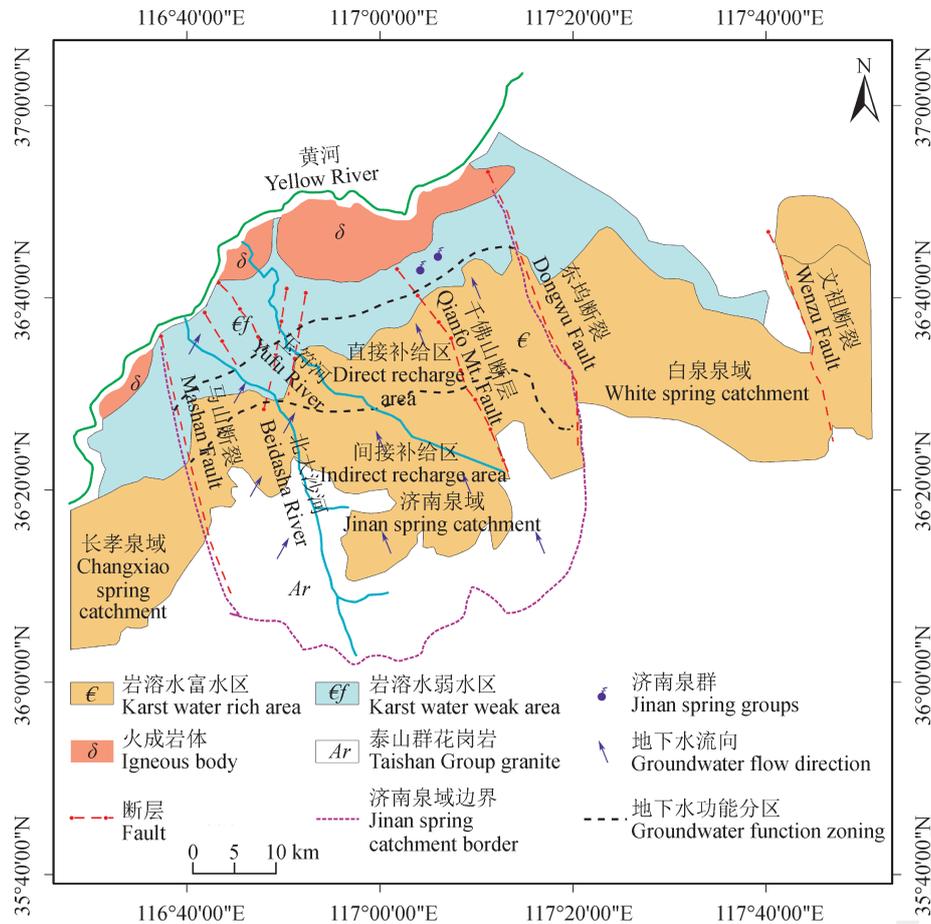


图1 济南泉域范围图
Fig.1 Jinan spring area range map

2.2 模型分类

(1) Holt 线性趋势模型

$$S_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + b_{t-1}), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

$$b_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)b_{t-1}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (2)$$

预测方程为: $y_{t+k} = S_t + b_t k$ (3)

(2) Holt-Winters 加法模型

$$S_t = \alpha(x_t - I_{t-L}) + (1 - \alpha)(S_{t-1} + b_{t-1}), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4)$$

$$b_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)b_{t-1}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (5)$$

$$I_t = \beta(x_t - S_t) + (1 - \beta)I_{t-1}, \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (6)$$

预测方程为: $y_{t+k} = S_t + b_t k + I_{t+k-L}$ (7)

(3) Holt-Winters 乘法模型

$$S_t = \alpha \frac{x_t}{I_{t-L}} + (1 - \alpha)(S_{t-1} + b_{t-1}), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (8)$$

$$b_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)b_{t-1}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (9)$$

$$I_t = \beta \frac{x_t}{S_t} + (1 - \beta)I_{t-1}, \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (10)$$

预测方程为: $y_{t+k} = S_t + b_t k + I_{t+k-L}$ (11)

式中: S_t 为平滑值即水平分量, α 为水平权重; b_t 为长期趋势值, γ 为趋势权重; I_t 为季节分量, β 为季节权重; L 为季节长度 (每年的月数或季数); t 为当前时间; x_t 为实际观测值; y_{t+k} 为预测值, k 为预测超前期数。

3 Holt-Winters 模型在泉域地下水生态保护中的应用

3.1 趵突泉地下水位波动分析

对 2012 年 5 月至 2017 年 11 月济南泉域的趵

趵突泉的地下水位数据进行分析, 水位变化的时序图见图2, 2010—2016 济南市降雨量见表1。

由图2可以看出趵突泉的水位整体呈现下降趋势, 在每一年中水位随着季节的变化出现波动并且表现出一定的规律。地下水位自每年3月开始下降, 5—6月份下降最为明显, 下降幅度最为迅猛, 主要原因是3月份入春之后, 气温回升快, 天气干燥, 降水少且蒸发量大, 土壤失水量大, 春旱严重。5—6月份济南市西郊春耕的开始, 大

量抽取地下水作为农业灌溉使用, 导致地下水位下降明显, 7月份之后由于春耕的陆续结束, 农田夏收夏种大量用水接近尾声, 趵突泉水位止跌回涨, 7—9月份汛期雨水较为丰富, 降雨形成的径流入渗补给了地下水使得地下水位逐渐抬升, 10月份之后降水减少, 水位逐渐回落。农业灌溉用水量主要受农作物的需水量和降雨量的影响, 济南市灌溉的主要水源为地下水, 当农作物的需水量较大而降雨量相对较小时需要进行人工灌溉。

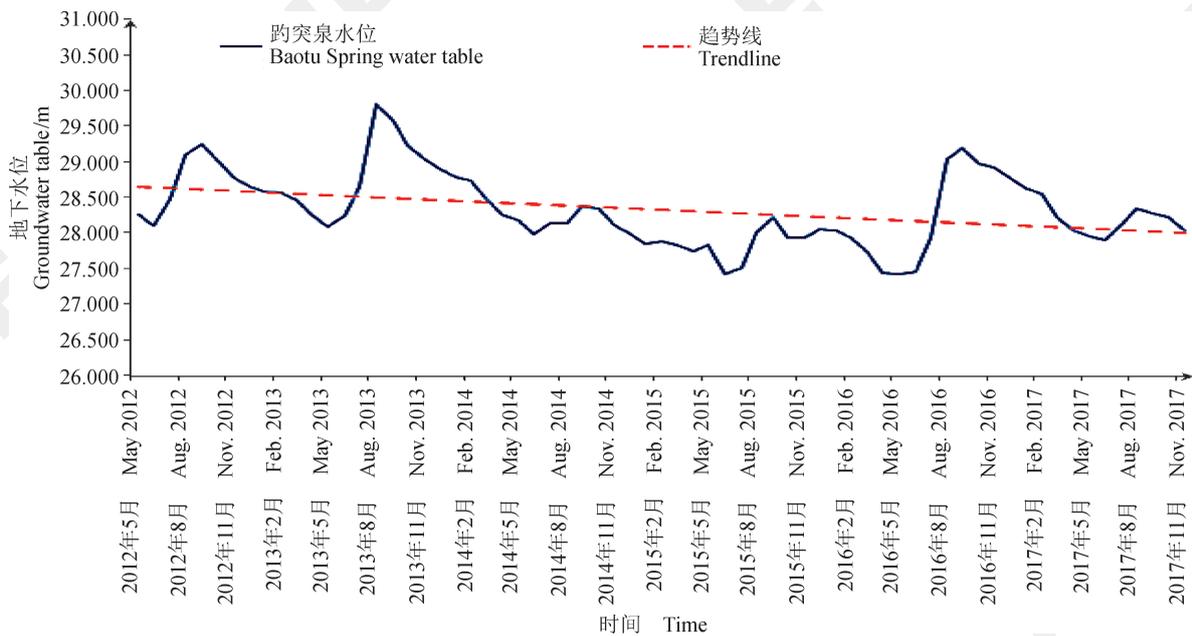


图2 水位变化的时序图

Fig.2 Timing diagram of the water table changes

表1 2010—2016年济南市降雨量
Tab.1 Rainfall in Jinan City from 2010 to 2016

年份 Year	降雨量 Precipitation/mm	丰枯情况 Abundance or shortage of water
2010	750.4	平水年 Normal flow year
2011	677.8	平水年 Normal flow year
2012	604.4	平水年 Normal flow year
2013	749.6	平水年 Normal flow year
2014	444.0	特枯水年 Dry year
2015	572.8	枯水年 Low flow year
2016	710.8	平水年 Normal flow year

由表1可知, 济南市近3年中: 2014年为特枯水年、2015年为枯水年、2016年为平水年, 连续2年遭遇枯水年, 降雨量较少使得岩溶水的补给量骤减。另一方面, 目前济南市的地下水开采布局, 主要还是开采泉域内的东部地下水, 少量开采济西岩溶水, 据济南市名泉办不完全统计, 目前济东地下水集中开采区, 日开采量22万吨。同期地下水开采量虽有降低但降幅较小, 因此, 在现状开采条件下, 趵突泉水位呈现出下降趋势, 为了维持泉水的持续喷涌, 采用回灌补源措施尤为重要。

通过分析可知济南名泉趵突泉的地下水位整体的变化规律既表现出下降的趋势又受到季节变化的影响, 因此, 利用 Holt-Winters 指数平滑模型对趵突泉的地下水位进行分析、预测较为合适。

3.2 数学模型的比选

借助 MATLAB 和 IBM-SPSS 数据处理软件, 对趵突泉 2012—2017 年逐月地下水位数据进行分析, 分别建立 3 种 Holt-Winters 指数平滑模型, 并对模型的拟合结果进行对比分析。模型统计量见表 2, 模型的拟合情况见表 3。

表 2 模型统计量表
Tab.2 Model statistics table

模型类型 Model type	Ljung-Box Q			
	统计量 Statistics	DF	Sig	离群指数 Number of outliers
线性趋势模型 Linear trend model	55.406	16.000	0.000	0.000
加法模型 Addition model	23.522	15.000	0.074	0.000
乘法模型 Multiplication model	16.711	15.000	0.336	0.000

表 3 模型的拟合情况表
Tab.3 Model fitting table

拟合统计量 Fit statistics	线性模型 Linear model	加法模型 Addition model	乘法模型 Multiplication model
平稳的 R^2 Stationary R-squared	0.225	0.627	0.558
R^2 R-squared	0.699	0.897	0.880
RMSE	0.291	0.171	0.185
MAPE	0.682	0.411	0.441
Max APE	3.910	2.099	2.521
MAE	0.195	0.117	0.125
Max AE	1.166	0.591	0.709
正态化的 BIC Normalized BIC	-2.342	-3.336	-3.181

表 2 给出了三种模型的 Ljung-Box Q 拟合统计量及离群值情况, 由分析结果可知所有数据中没有离群值 (孤立点), 既数据平滑性较好, 未出

现个别数值与整体趋势值相比差异较大的情况, 说明数据较为可靠。此外, Holt 线性趋势模型的显著水平 $\text{Sig}=0<0.05$ 说明拟合之后的残差存在自相关, 这种情况下不考虑使用 Holt 线性趋势模型进行拟合预测。Holt-Winters 加法与乘法模型的显著水平 $\text{Sig}>0.05$, 说明残差是白噪声, 符合建模要求且二者的 Ljung-Box Q 统计量数值较为接近, 差异不明显。综合以上的分析结果, 对趵突泉的地下水位分析、预测优先使用 Holt-Winters 加法或乘法模型。

每种模型选取了 8 个拟合情况度量指标的平均值进行分析, 由表 3 模型的拟合情况分析可知: 加法与乘法模型的正态化 BIC 的值均较小, 说明模型的拟合效果均较好。此外, Holt-Winters 加法模型的“平稳的 R^2 ”和 R^2 (决定系数) 值均为最大, 数值分别为 0.627 和 0.897。加法模型的 RMSE (均方根误差)、MAPE (平均相对误差绝对值)、Max APE (最大平均相对误差绝对值)、MAE (平均绝对误差)、Max AE (最大平均绝对误差) 评价指标均为最小, 说明加法模型相对于乘法模型的误差项更小, 对原始数据的拟合更准确。因此, 最终选择 Holt-Winters 加法模型作为预测模型。

3.3 最优模型的应用

通过 3 种数学模型的比选与分析, 最终选择拟合效果最好的 Holt-Winters 加法模型对济南泉域趵突泉的地下水位进行拟合, 在此基础上利用模型预测了 2018 年趵突泉水位的变化。指数平滑法拟合的加法模型参数见表 4, 观测值与拟合值、预测值时序图见图 3。

表 4 中可以看出 Holt-Winters 加法模型的水平分量 Alpha 的值为 1, 显著水平 $p=0$, 结果具有显著性。趋势分量 Gamma 的值为 0.001, 显著水平 $p=0.991$, 季节分量 Beta 的值为 0.001, 显著水平 $p=1$, 由此可以判断济南泉域趵突泉历年的地下水位变化主要受水平分量的影响较大, 受趋势分量和季节分量的影响相对较小。因此, 该模型适用于基于近期观测值的预测, 对中、短期内正常气象条件下趵突泉的地下水位变化规律的预测效果较好, 精度较高。

图 3 给出了 Holt-Winters 加法模型的拟合、预测值及其置信区间, 在 2017 年 11 月以前, 图中的蓝线表示水位观测值, 红线表示水位拟合值;

2017年12月至2018年12月红线表示水位预测值,上下的两条虚线表示根据拟合值和预测值95%的置信区间计算出的上、下区间值。图中实际观测序列、模型拟合序列的变化趋势高度相近且模型较为成功地预测了水位波动的峰值和谷值,可以判定使用该模型是较为合理的。

3.4 模型的验证

图4残差的自相关(ACF)和偏自相关(PACF)序列图,仅在滞后12阶和24阶时残差与偏残差超出置信边界,其余均随机的分布在边界范围内,可认为超出置信边界的个别数据是偶然因素造成的数据异常点,因而可将其忽略。另外,两个图形都无显著的趋势特征(拖尾或结尾),由此可

以判定所建的模型较为合适,模型整体的拟合度较高。

表4 Holt-Winters模型的参数估计表
Tab.4 Holt-Winters model parameter estimation table

模型类型 Model type	预测量 Number of predictor	SE	<i>t</i>	Sig	
加法模型 Addition model	水平 Alpha	1.000	0.140	7.134	0.000
	趋势 Gamma	0.001	0.050	0.011	0.991
	季节 Beta	0.001	3645.845	0.000	1.000

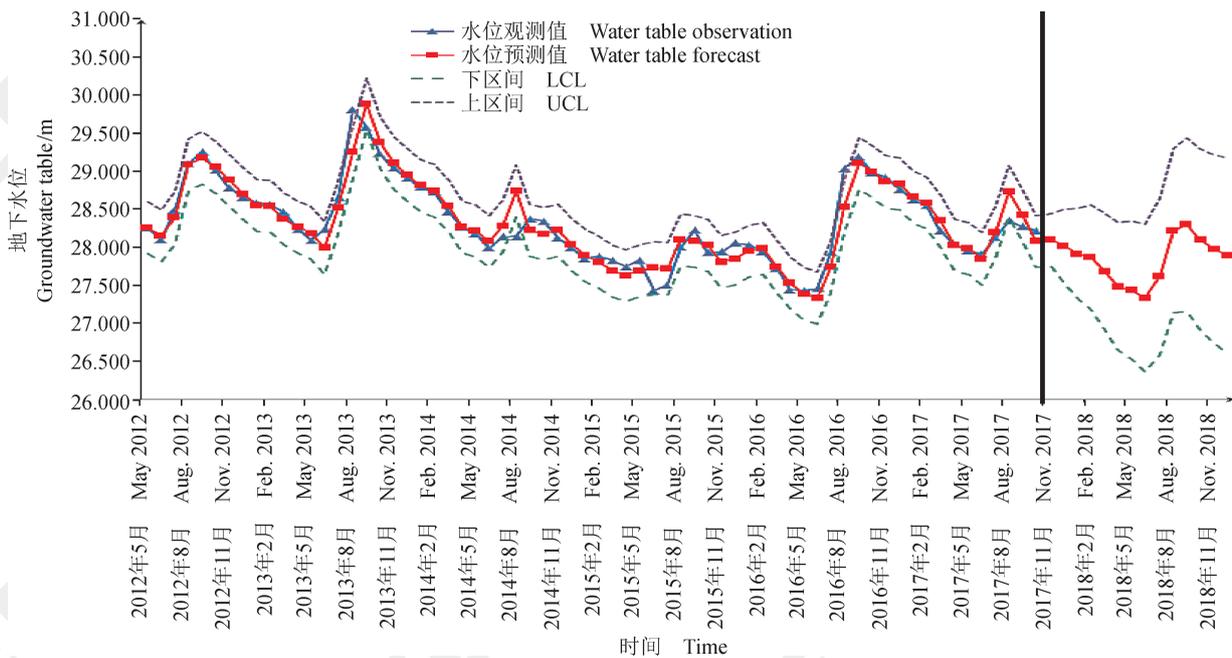


图3 观测值与拟合值、预测值时序图

Fig.3 Observations and fitted values, the predicted value of the timing diagram

3.5 预测结果分析

建立 Holt-Winters 加法模型对趵突泉的地下水水位进行预测,预测了趵突泉2017年12月至2018年12月的地下水水位,地下水水位预测值见表5,预测结果表明:趵突泉的地下水水位在未来的13个月整体呈下降趋势且水位标高平均值为27.814 m,2018年6月泉水水位最低仅为27.329 m,低于《济南市保持泉水喷涌应急预案》规定的27.6 m的保泉红色警戒线,距27.01 m的停喷线只有31.9 cm,

为近年来的最低水位,存在潜在停喷危机。由此可见,济南市2018年“保泉”形势不容乐观,任务依然严峻。

表6为2013—2018年趵突泉的年平均水位数值,由于2014、2015年济南市遭遇了连续的枯水年,岩溶水的补给量较少,农业灌溉对地下水的开采量较大,趵突泉水位出现明显下降;2016、2017年为平水年,济南市政府及时采取了保泉应急措施,加大了地表水源的使用力度,关停了部分自备井,一

定程度上降低了地下水的开采量, 因此, 泉水位出现小幅上涨, 但由于有效降雨量增加并不明显, 地下水超采造成的局部降落漏斗使得短时期内泉水位难以持续上涨。利用加法模型预测了2018年的泉水

位数值, 预测结果为6年内最低水平且仍有不断下降的趋势, 此外, 2018年的地下水位预测值与2017年同期的年平均水位观测值相比降低了37.9 cm, 降幅较大, 采用必要的调蓄补源措施尤为重要。

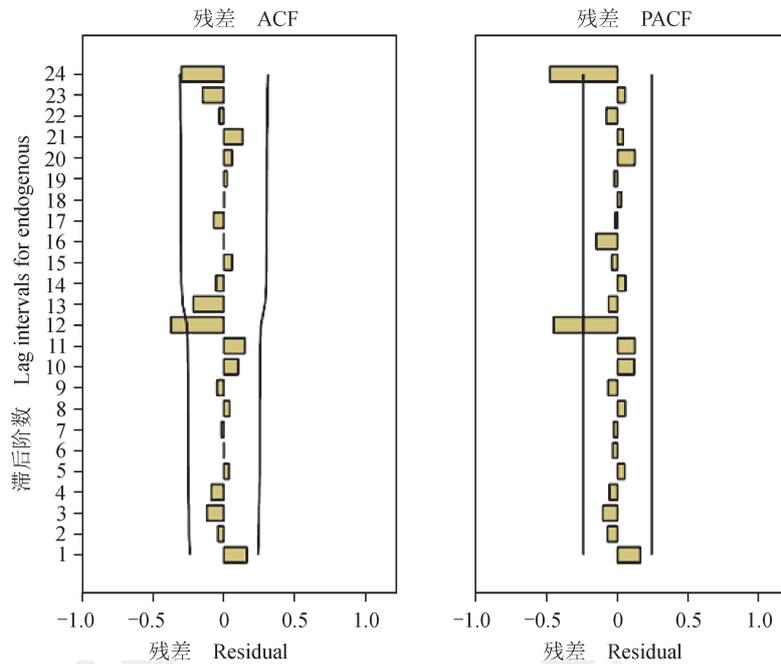


图4 模型残差自相关函数和偏自相关函数图

Fig.4 Model residual autocorrelation function and partial autocorrelation function graph

表5 趵突泉地下水位预测表
Tab.5 Groundwater table prediction of Baotu Spring

时间 Time	预测值 Predictive value/m	上区间 UCL/m	下区间 LCL/m	时间 Time	预测值 Predictive value/m	上区间 UCL/m	下区间 LCL/m
2017年12月 Dec. 2017	28.011	28.495	27.526	2018年7月 Jul. 2018	27.614	28.640	26.584
2018年1月 Jan. 2018	27.911	28.505	27.318	2018年8月 Aug. 2018	28.215	29.300	27.129
2018年2月 Feb. 2018	27.866	28.552	27.181	2018年9月 Sep. 2018	28.291	29.430	27.152
2018年3月 Mar. 2018	27.676	28.442	26.909	2018年10月 Oct. 2018	28.093	29.280	26.902
2018年4月 Apr. 2018	27.479	28.319	26.639	2018年11月 Nov. 2018	27.974	29.210	26.734
2018年5月 May 2018	27.430	28.338	26.522	2018年12月 Dec. 2018	27.888	29.180	26.602
2018年6月 Jun. 2018	27.329	28.300	26.358				

4 应对措施

济南市应抓住水生态文明城市建设的契机, 根据趵突泉岩溶水补给区的地形、地貌和水文地质特征, 将国内外先进的技术和理念与济南市的实际情况相结合, 以规划为引导, 趵突泉泉域尺

度与区域尺度相结合, 采取有效的回灌补源措施, 增加泉域泉水的补给, 实现泉水的持续喷涌。

趵突泉泉域尺度上, 济南泉群的地下岩溶水系统补给区内, 存在渗透条件较好的沟谷、河流, 大多灰岩裸露或薄层砂砾石覆盖具有良好的地下

径流通道, 大气降雨可迅速下渗补给岩溶地下水, 因此, 利用天然的渗漏“天窗”进行人工回灌, 或在泉群内利用高压注水, 将市区泉域产生的雨水径流尽可能地消化在泉域内, 这样不仅可以减少市区的消防压力、增大雨水蓄滞能力和泉域的

岩溶水补给量, 而且能利用含水层自身的净化作用, 改善回灌的水质, 保障了趵突泉良好的岩溶水水质(万云霞等, 2010)。其次, 泉水可先观后用, 泉水出流完成其观赏功能后, 经过处理可以输入管道供生活和生产使用。

表6 2013—2018年趵突泉年平均水位
Tab.6 Annual average water level of Baotu Spring in 2013—2018

年份 Year	年平均水位 Average annual water table/m	水位最小值 Minimum water table/m	水位最低的月份 The month of the lowest water table	水位最大值 Maximum water table/m
2013	28.779	28.086	5	29.806
2014	28.290	27.989	6	28.372
2015	27.846	27.427	6	28.219
2016	28.232	27.427	6	29.185
2017	28.193	27.901	6	28.621
2018	27.814	27.329	6	28.291

区域尺度上, 济南市山前地带因城市化建设导致岩溶水补给量骤减, 因此, 考虑收集屋面雨水及使用透水砖和透水性的混凝土路面促渗等补偿措施增加岩溶水补给量。此外, 加强客水(黄河水、长江水)调水补源力度(乔令海等, 2013), 增加卧虎山水库放水量和大辛河补源量, 使用大明湖弃水和五库连通工程保持兴济河补源量。另一方面, 优化地下水开采布局、强化用水监管力度, 严格控制地下水开采量, 减少泉域内东部地区的地下水开采量, 由玉清湖水库替代供水, 同时, 扩大东部工业区使用地表水源的范围, 关停原有的自备井, 最终实现地下水、地表水联合开发, 统一规划调度, 改善济南泉域地下水环境。

以上措施对济南市构建水生态文明城市, 高效地回灌岩溶地下水, 提高市区泉群泉水的补给能力具有重要的意义; 同时对生态水系构建、水资源保护、地下水生态维护和泉群喷涌保障等技术研究, 构建水生态文明建设关键技术体系, 为济南市评判、预测、调整水系及地下水开采布局提供科学依据, 为济南实现“泉涌、湖清、河畅、水净、景美”提供技术支撑, 为国家制定水生态文明城市建设标准和考核评价体系提供参照。

5 结论

通过对济南泉域趵突泉 2012—2017 年逐月的

地下水位变化规律进行分析, 发现趵突泉的地下水位既存在不断下降的趋势, 又受到季节变化的影响, 因此, 考虑建立指数平滑模型对名泉趵突泉的地下水位进行分析预测。首先建立 3 种常用的 Holt-Winters 指数平滑模型, 分别对趵突泉历年的地下水位数据进行拟合; 通过对模型的 Ljung-Box Q 统计量和 8 种拟合优度指标的对比, 最终确定利用 Holt-Winters 加法模型对地下水位数据分析、预测, 该方法具有较高的预报精度, 且计算过程较为简便, 可信度、拟合优度指标及拟合统计量均较高, 可以作为中、短期正常气象条件下地下水位预报方法之一。

利用 Holt-Winters 加法模型预测了 2018 年趵突泉的地下水位数值, 预测结果显示 2018 年的泉水位均值为 27.814 m, 泉水位波动的峰值为 28.291 m、谷值为 27.329 m 且谷值将出现于 2018 年的 6 月份, 为近 6 年来的最低水位值, 低于 27.6 m 的保泉红色警戒线, 接近 27.01 m 的泉水停喷线, 如果水位下降势头无法有效缓解, 在 2018 年雨季来临之前, 趵突泉将存在潜在停喷危机。

近期济南市降水量比常年同期略有减少, 秋冬季节降水量持续偏少, 地表水供给不足, 加之不合理开采地下水, 造成济南市泉域地下水位的持续下降; 另外, 泉水补给区面积减少, 重点渗漏带功能减弱使得岩溶水有效补给量骤减, 2018

年春季还将有大面积的农业灌溉, 届时对泉水水位影响将会更加明显。

参考文献

- 蔡五田, 高宗军, 王庆兵, 等. 2013. 济南岩溶水系统水力联系研究 [M]. 北京: 地质出版社: 1-113. [Cai W T, Gao Z J, Wang Q B, et al. 2013. Research on connections between Jinan karst waters [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-113.]
- 高宗军, 徐军祥, 王世臣, 等. 2014. 济南岩溶水微量元素分布特征及其水文地质意义 [J]. *地学前缘*, 21(4): 135-146. [Gao Z J, Xu J X, Wang S C, et al. 2014. The distribution characteristics and hydrogeological significance of trace elements in karst water, Jinan, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 21(4): 135-146.]
- 冷爱国, 刘福臣. 2011. 济南泉群滞迟效应及泉流量预测分析 [J]. *人民黄河*, 33(4): 36-37. [Leng A G, Liu F C. 2011. Analysis on lag effect of spring groups and spring discharge forecast of Jinan [J]. *Yellow River*, 33(4): 36-37.]
- 牛景涛, 吴兴波, 宋星原, 等. 2004. 济南回灌补源与抽水试验研究 [J]. *人民长江*, 35(11): 47-48. [Niu J T, Wu X B, Song X Y, et al. 2004. Test and study of underground water recharge for water sources supplement and water pumping in Jinan city [J]. *Yangtze River*, 35(11): 47-48.]
- 祁晓凡, 杨丽芝, 韩 晔, 等. 2012. 济南泉域地下水位动态及其对降水响应的交叉小波分析 [J]. *地球科学进展*, 27(9): 969-978. [Qi X F, Yang L Z, Han Y, et al. 2012. Cross wavelet analysis of groundwater level regimes and precipitation-groundwater level regime in Jinan spring region [J]. *Advances in Earth Sciences*, 27(9): 969-978.]
- 乔令海, 刘桂仪, 梁 伟, 等. 2013. 南水北调地下调蓄在济南保泉供水中的可行性研究 [J]. *安全与环境工程*, 20(6): 23-28. [Qiao L H, Liu G Y, Liang W, et al. 2013. Feasibility study of the spring protection and water supply in Jinan by the underground storage from South-to-North Water Transfer Project [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 20(6): 23-28.]
- 万云霞, 刘福臣. 2010. 济南泉域地下水动态分析及保泉供水调度 [J]. *节水灌溉*, (7): 32-33. [Wan Y X, Liu F C. 2010. Dynamic analysis of groundwater in fountain district of Jinan city and dispatch of water supply for protecting fountain [J]. *Water Saving Irrigation*, (7): 32-33.]
- Veiga C P D, Veiga C R P D, Catapan A, et al. 2014. Demand forecasting in food retail: A comparison between the Holt-Winters and ARIMA models [J]. *Wseas Transactions on Business & Economics*, 11(1): 608-614.
- Wu L, Gao X, Xiao Y, et al. 2017. Using grey Holt-Winters model to predict the air quality index for cities in China [J]. *Natural Hazards*, 88(2): 1-10.