

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.04.20

灰色系统 GM(1,1) 模型在地下热水水位预测中的应用 ——以河北省廊坊市为例

徐 敏, 王立兵, 谢德尚

(河北省地质测绘院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 近年来, 地热资源作为一种绿色清洁能源越来越受到国家重视, 开采利用的规模也越来越大。如何对地下热水水位的变化趋势进行准确预测, 为政府决策提供技术依据显得尤为重要。由于水位监测数据有限, 尝试采用灰色系统 GM(1,1) 模型, 对廊坊市不同热储层地热井的地下热水水位进行了预测。通过对原始数据进行“一次累加, 均值处理, 构建预测模型, 得出时间响应函数, 求解预测值”等计算过程处理, 结果显示预测值与实际值基本吻合, 这也验证了采用灰色系统 GM(1,1) 模型对廊坊市地下热水水位进行预测具有良好的效果。模型预测结果表明廊坊市地下热水水位呈逐年下降趋势, 建议政府采取“推广地热资源的梯级利用, 限制开采量、采补结合”等措施, 合理开发利用地热资源, 遏制地下热水水位不断下降的趋势, 使地热资源得到可持续利用。

关键词: 灰色系统; GM(1,1) 模型; 地下热水; 水位; 热储层

中图分类号: P345

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)04-0135-05

The application of GM(1,1) model of grey system in prediction of geothermal water level: a case study in Langfang City, Hebei Province

XU Min, WANG Libing, XIE Deshang

(Institute of Geological Surveying and Mapping of Hebei Province, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: In recent years, geothermal resources are paid more and more attention as a kind of green and clean energy and its exploitation and utilization are more and more widely. It is important for the government to make decision how to predict the change trend of underground hot water level. Because the monitoring data of water level are limited, we adopt grey system GM(1,1) model to predict the geothermal water level of the geothermal well in different thermal reservoir in Langfang city. The calculation process is: a cumulation, average processing, building prediction model, getting the time response function, and solution predictive value, and the calculation result shows that the predicted values are basically in line with the actual values. It is also verified that the grey system GM(1,1) model has a good effect on the prediction of geothermal water level in Langfang City. According to the predicted results, the water level of underground hot water in Langfang is decreasing year by year. It is suggested that measures for sustainable use of geothermal resources such as “the promotion of the ladder use of geothermal resources, the limitation of the amount of exploitation and the combination of exploitation and replenishing” should be adopted to guarantee the rationally exploitation of geothermal resources and curb the declining water level.

Keywords: grey system; GM(1,1) model; geothermal water; water level; thermal reservoir

收稿日期: 2017-11-17; 修订日期: 2017-12-28

第一作者: 徐 敏 (1984-), 女, 河北衡水人, 硕士, 工程师, 主要从事地热地质、水文地质、环境地质等方面的研究。E-mail: 330178606@qq.com

0 引言

两千多年前我国已经开始使用地热资源,但直到 20 世纪 70 年代,地热资源的开发利用才逐渐形成一定的规模,并形成以采暖、洗浴、医疗、旅游、养殖、发电等不同用途的地热资源开发利用格局。在全球气候变化和环境污染普遍受到关注的形势下,伴随着能源危机的出现,地热资源作为一种洁净的能源,地热资源的勘查、开发、利用普遍受到国内外的高度重视。但随着地热井开发利用的增多,也出现了许多的环境地质问题,其中深层地下热水水位逐年下降就是遇到的问题之一。目前,对地下热水水位预测的研究方法很多,主要有数值模拟、灰色理论、神经网络理论、小波分析等,主要以数值模拟为主,数值模拟是利用模拟软件进行地下水位动态趋势分析的一种方法,它对基础水文地质资料要求多,边界条件要求严格。灰色系统理论模型是我国学者邓聚龙教授 1982 年提出的,是一种针对研究数据少、信息不确定性问题的方法,灰色系统预测通过原始数据的处理和灰色模型的建立,发现、掌握系统发展规律,对系统的未来发展状态做出科学的预测^[1]。地下热水水位受热储层构造、地层渗透性、周围补给等地质条件的影响,不确定性比较大,并且地热井开采深度大,后期由于矿权人的开采利用设备的一体化,井口一般都与管网连接,存在监测数据受限的情况,廊坊地区这种现象普遍存在,针对这一情况,本文尝试用灰色系统模型来预测深层地热水水位变化趋势。

1 灰色系统 GM(1,1)模型

灰色系统 GM(1,1)模型是以灰色系统的理论思想为基础,将离散变量连续化,用微分方程代替差分方程,这样可以抵消随机误差,同时可以对变化过程做较长时间的描述,进而建立微分方程模型,建模的实质是建立微分方程的参数,灰色系统 GM(1,1)模型的建模过程和机理如下^[2-5]:

若原始非负等时序列:

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(m)\} \quad (1)$$

式中: x ——数列预测变量;

m ——个数。

对于上述(1)式原始数列进行一次累加,得到累加序列:

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(m)\} \quad (2)$$

式中: $x^{(1)}(k) = \sum_{u=1}^k x^{(0)}(u) (k = 1, 2, \dots, m)$;

k ——个数。

对上述累加序列做平均值处理得:

$$z^{(1)} = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)) \quad k = 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

式中: z ——累加序列均值。

由此得 GM(1,1)基本模型为:

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = w \quad (4)$$

建立 GM(1,1)预测模型白化微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = w \quad (5)$$

式中: a ——发展变化系数;

w ——灰色预测模型作用量; a, w 是通过构建的灰色预测模型求解的参数。

若 $\hat{a} = (a, w)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$ $Y_N = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(m)]^T$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}$$

式中: B ——数据列;

Y_N ——数据列。

则白化微分方程的解:

$$x^{(1)}(t+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{w}{a}\right)e^{-at} + \frac{w}{a} \quad (6)$$

将式(6)应用于地下热水水位预测时可表示为:

$$x^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{w}{a}\right)e^{-ak} + \frac{w}{a} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

将原始数据代入上述预测模型,进而得到原始数据的预测值,并与原始数据监测值做残差检验,则拟合误差(残差)为:

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

式中: $\varepsilon(k)$ ——拟合误差。

相对误差为:

$$\Delta_k = \left| \frac{\varepsilon(k)}{x^{(0)}(k)} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中: Δ_k ——相对误差, $k = 1, 2, \dots, m$ 。

若模型预测满足精度要求,便可用于进行不同工作目的预测,否则,需做残差修正^[4],直到达到精度要求为止。

2 GM(1,1)模型地下热水水位预测

2.1 研究区概况

廊坊市位于河北省中部偏东,地处北京天津之间,位于环渤海腹地,享有“京津走廊明珠”、“连京津之廊、环渤海之坊”的美誉。地理坐标:北纬 $39^{\circ}28'42'' \sim 39^{\circ}32'54''$,东经 $116^{\circ}38'07'' \sim 116^{\circ}44'06''$,具有较好的区位优势,是地热资源比较丰富的地区之一,辖南三区五县(广阳区、安次区和廊坊经济技术开发区三个区,永清县、固安县、文安县、大城县、霸州市)、北三县(大厂回族自治县、香河县、三河市),在河北平原中部属地热资源条件较好地区之一,幅员面积 $6\,429\text{ km}^2$ 。近年来廊坊市已陆续施工了几十眼新的地热井,霸州市、固安县、永清县地热开采已形成一定规模。但随着地热井开采利用的增多,也暴露出了不少问题:一是廊坊市地热资源总体开采水平较低;二是地热开发以单井独户利用方式为主,规模化、产业化水平不高;三是地热开发缺乏科学规划的指导,部分城镇区存在盲目打井现象,地热井不能合理安排,地热水开采强度过大,个别井有开采过量情况;四是利用方式粗放,未完全梯级利用,尾水排放温度过高,资源浪费现象比较普遍;五是缺少地热资源保护的有力措施,地热尾水回灌及地热水长期动态监测等措施落实程度低。

廊坊区内地下热水主要用于供暖、洗浴、养殖、种植等,获得了较好的经济效益和社会效益。研究区地热资源属于断陷盆地型中-低温地热资源,在大地构造单元上,廊坊市处于中朝准地台(I_2),Ⅱ级构造单元横跨了华北断坳(II_4^1)和燕山台褶带(II_2^2)。根据赋存条件,廊坊市地热资源分为新生界碎屑岩孔隙型热水和古生界、中元古界碳酸盐岩岩溶裂隙型热水,自上而下热储层热水主要包括新近系明化镇组(Nm)孔隙型热储热水、新近系馆陶组(Ng)孔隙型热储热水、古近系东营组(Ed)孔隙型热储热水、古近系沙河街组(Es)孔隙型热储热水、古生界寒武-奥陶系基岩裂隙岩溶热储($\epsilon-O$)热水、中元古界蓟县系雾迷山组基岩裂隙岩溶热储(Jxw)热水。

2.2 研究区地热资源水位动态特征

廊坊市地下热水水位动态变化主要受用户开采量大小、地热地质条件等因素的影响,随着国家倡导绿色、环保、清洁能源的使用,近年来地热被大规模开发利用,先期开发利用过程中,过量开采、只采不灌的地热资源利用方式,使地热水水位总体呈逐年下降趋势^[6-8],尤其是基岩热储层的开采,水位降幅变化特

别明显,甚至有的地热井水位下降幅度超过 10 m/a 。

廊坊市孔隙型热储层主要包括新近系明化镇组和馆陶组,其中明化镇组热储层地热井主要分布于廊坊市区、永清县、文安县、霸州市,馆陶组热储层地热井主要位于文安县、霸州市;裂隙型热储层主要包括寒武-奥陶系和蓟县系,裂隙型热储层地热井主要分布于永清县、固安县、霸州市以及北三县。我们选取了2012~2016年三眼不同热储层的地热井水位监测数据,其中,DR1井开采层位为新近系明化镇组,DR2井开采层位新近系馆陶组,DR3井开采层位为蓟县系雾迷山组,预测模型原始数据监测值见表1,位置分布图见图1。

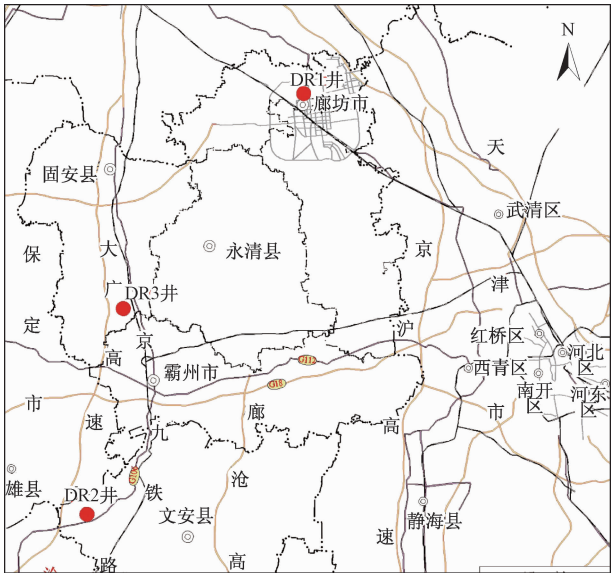


图 1 不同热储层地热井相对位置图

Fig.1 Relative position of geothermal wells in different thermal reservoirs

表 1 不同热储层地热井水位埋深观测值表 单位:m

Table 1 Observation water levels in geothermal wells in different thermal reservoirs

年份	DR1	DR2	DR3
2012	76.79	53.31	79.30
2013	78.34	56.17	82.15
2014	79.55	59.78	83.68
2015	81.68	61.82	86.63
2016	86.19	63.68	90.64

2.3 研究区预测结果及分析

通过 GM(1,1)模型预测,由原始数据分别求得了 DR1 井、DR2 井、DR3 井对应的时间响应函数,分别如下:

DR1 井: $x(k+1) = 2\,402.68e^{(-0.32k)} - 2\,325.89;$

$$\text{DR2 井: } x(k+1) = 1\,374.38e^{(-0.04k)} - 1\,321.07;$$

$$\text{DR3 井: } x(k+1) = 2\,406.43e^{(-0.03k)} - 2\,327.13;$$

利用上述函数分别得出三个预测模型的预测值和预测误差(表2),同时绘制出了地下热水水位实测值与预测值拟合曲线图(图2~图4)。从拟合曲线图中可以看出,地热水水位实测值和拟合值曲线形状相似,拟合的比较好,经过 GM(1,1)模型残差和相对误差检验,各热储层地热井的相对误差都小于5%,相对误差最大的为2015年的DR1井,可能是由于人为观测数值误差造成的,但也在误差范围内。从图2~图4中可以看出,三个不同热储层地热开采井的实测地热水位值与预测值的拟合曲线拟合的比较好,预测精度较高,符合灰色模型预测精度要求。由实测数据与预测数据可知:廊坊市各不同热储层地热井地下热水位变化趋势较明显,都呈逐年下降趋势,是由于人工开采量大于地热水补给量,所以针对这种现象,政府部门要引起高度重视。由计算过程可以看出,用灰色系统 GM(1,1)模型预测地热井水位过程简单实用,并且容易操作,预测精度较高。综上所述,在数据相对较少的情况下,灰色系统理论可以较准确地预测地下热水位埋深在今后一段时期内的变化趋势,为地热井开采和地下热水管理提供重要信息和依据^[9]。

表2 不同热储层地热井水位埋深预测值表

Table 2 Prediction water level of different geothermal wells in different thermal reservoirs

井号	时间/a	模拟值/m	残差/m	相对误差/%
DR1 (Nm)	2012	76.79	0.00	0.00
	2013	77.59	-0.75	0.96
	2014	80.10	0.55	0.69
	2015	82.68	1.00	1.23
	2016	85.35	-0.84	0.97
	2017	88.11	—	—
DR2 (Ng)	2012	53.31	0.00	0.00
	2013	56.74	0.57	1.02
	2014	59.09	-0.69	1.16
	2015	61.52	-0.30	0.48
	2016	64.06	0.38	0.60
	2017	66.71	—	—
DR3 (Jxw)	2012	79.30	0.00	0.00
	2013	81.53	-0.62	0.76
	2014	84.29	0.61	0.73
	2015	87.15	0.52	0.60
	2016	90.10	-0.54	0.60
	2017	93.15	—	—
	2018	96.31	—	—

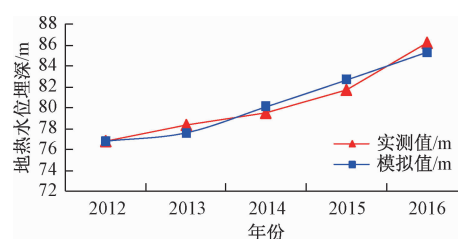


图2 DR1井地下热水水位实测值与预测值拟合曲线

Fig.2 Fitted curve of measured and predicted geothermal water level in DR1 well

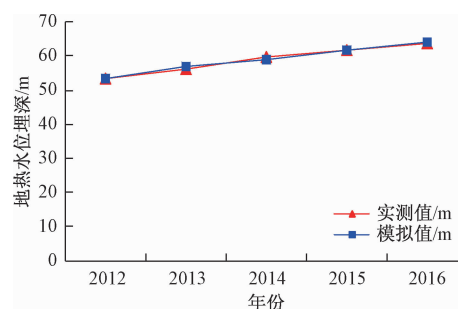


图3 DR2井地下热水水位实测值与预测值拟合曲线

Fig.3 Fitted curve measured and predicted geothermal water level in DR2 well

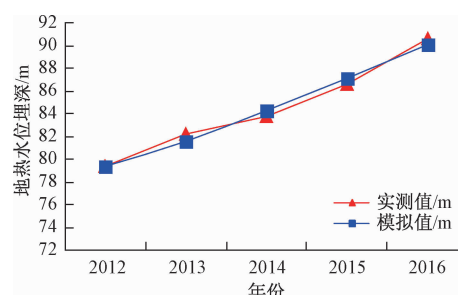


图4 DR3井地下热水水位实测值与预测值拟合曲线

Fig.4 Fitted curve of measured and predicted geothermal water level in DR3 well

3 结论与建议

(1) GM(1,1)模型建模过程相对简单,所需原始数据较少,拟合精度较高,在深层地热水监测条件有限的条件下,对地下热水水位预测,具有很好的预测效果。

(2) 建议在利用灰色系统 GM(1,1)模型进行模拟预测时,预测的时间过程不应该过长过多,同时根据监测数据值需不断调整 GM(1,1)模型的参数,进而不断提高灰色预测模型的预测精度。

(3) 建立研究区地热水水位变化的动态预测模型,及时掌握各热储层水位变化情况,以便及时采取地

热井开采管理措施,对研究区地下热水合理开发利用具有一定的实用价值,为地热资源保护和环境保护提供科学依据,必要时对开采地热井进行对应的配套回灌井是很有必要的。

(4)由于地热井开采强度的不断加大及地热开采井的不断增多,近年来廊坊市各热储层水位呈现逐年下降的趋势,建议政府部门采取必要的措施,缓解地下热水水位持续下降,否则会导致地面沉降、建筑物基础受损等现象的发生。

(5)加强立法管理和科学管理,以使区内地热资源得到合理地开发利用和保护。对因水位下降出现地下漏斗的地区,地方政府必须予以重视,积极采取行之有效的措施,推广地热资源的梯级利用,并采取限制开采量、采补结合等,减少地热流体的消耗和对环境的污染,提高地热能的利用率,维护地热资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] 富飞. 灰色 GM(1,1) 模型在地下水位动态预测中的应用[J]. 地下水, 2014, 36(1): 79-92.
FU Fei. The application of GM(1,1) model of grey system in prediction of groundwater level[J]. Ground Water, 2014, 36(1): 79-92.
- [2] 王贵玲, 蔺文静, 刘花台, 等. 太行山前倾斜平原区地下水位动态特征分析及其趋势预测——以河北省栾城县为例[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 19-23.
WANG Guiling, LIN Wenjing, LIU Huatai, et al. Research on groundwater regime and its changing trends in Taihang Mountain foot Plain of North China: A case study of Luancheng County, Hebei Province [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(1): 19-23.
- [3] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 40-50.
LIU Sifeng, XIE Naiming. The grey system theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 40-50.
- [4] 田光辉, 曾梅香, 程万庆, 等. 灰色系统 GM(1,1) 模型在天津地下热水水位预测中的应用[J]. 地下水, 2009, 31(6): 8-10.
TIAN Guanghui, ZENG Meixiang, CHENG Wanqing, et al. Application of GM(1,1) model of grey system in predication of geothermal water level in Tianjin[J]. Ground Water, 2009, 31(6): 8-10.
- [5] 李俊亭, 王文科. 灰色系统理论在水文地质工程地质中的应用[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(6): 17-18.
LI Juntong, WANG Wenke. The application of grey system theory in hydrogeology and engineering geology [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997, 24(6): 17-18.
- [6] 李卓, 张光辉, 王茜, 等. 冀中平原地热水资源变化特征与可持续利用性——以辛集地热田为例[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 150-154.
LI Zhuo, ZHANG Guanghui, WANG Qian, et al. Variation characteristics and sustainable utilization of geothermal water resources in Central Hebei Plain: a case study of Xinji geothermal field[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 150-154.
- [7] 朱丽, 刘珊珊, 昌诚, 等. 基于灰色预测模型的水资源可持续利用研究——以常州武进区为例[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(9): 55-59.
ZHU Li, LIU Shanshan, CHANG Cheng, et al. Studies on sustainable utilization of water resources based on grey prediction model: A case study on Changzhou Wujin district [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(9): 55-59.
- [8] 李俊峰, 贾志, 张芬娜, 等. 天津市蓟县系雾迷山组热储层水位动态变化及趋势预测研究[J]. 地质调查与研究, 2013, 36(3): 221-225.
LI Junfeng, JIA Zhi, ZHANG Fenna, et al. Research on the change and trend prediction of the water level of Wumishan geothermal reservoir in Jixian system, Tianjin[J]. Geological Survey and Research, 2013, 36(3): 221-225.
- [9] 周振民, 赵明亮, 李玲. GM(1,1) 模型在滦河下游地区地下水位预测中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 50-52.
ZHOU Zhenmin, ZHAO Mingliang, LI Ling. The application of GM(1,1) model to the prediction of underground water level in the downstream of the Luanhe river [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(2): 50-52.