

基于非等间距序列 GM(1,1) 模型的地下水温度预测

黄景锐¹, 胡安焱¹, 张焕楚¹, 李 霞²

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054)

摘要: 地下水温度是地下水源热泵系统设计中的一个重要参数, 它关系到热泵系统换热器的选型计算以及整个系统的优化设计, 所以在地热井勘探和使用过程中, 通过定期监测各层段地下水的温度, 预测地下水温度随深度的变化规律, 为地下水源热泵设计、运行、成井工艺等提供参考资料, 具有非常重要的实用价值。基于灰色理论基础, 应用西安市泾河开发区两口观测井 30 ~ 108m 的实测水温作为原始数据, 构建非等间距序列 GM(1,1) 预测模型, 预测其 128 ~ 150m 的水温变化情况。结果表明: 模拟结果与实际值拟合好, 该模型能够较好地预测地下水温度随埋藏深度的变化趋势, 是分析地下水温度垂向变化趋势的一种新途径。

关键词: 非等间距序列 GM(1,1) 模型; 地下水温度; 趋势预测

中图分类号: P314.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)01-0048-05

地下水是应用地下水源热泵的前提, 地下水系统的水温会直接影响地下水源热泵的运行效果, 包括地下水源热泵的制热(冷)效率的高低和使用寿命, 所以对地下水温度进行完整的调查分析是非常重要的^[1~3]。

地下水的温度是地下水源热泵系统设计中的一个重要参数, 它关系到热泵系统换热器的选型计算, 以及整个系统的优化设计^[4~5], 所以在地热井勘探和使用过程中, 通过定期监测各层段地下水的温度, 掌握地下水温度随深度的变化规律, 预测地下水温度随深度的变化值, 为成井工艺等提供参考资料具有十分重要的意义^[6]。由于目前对地下水温度随深度变化情况的研究成果较少^[5], 加上限于一些客观因素的制约, 将仪器直接放入钻孔深部测量水温难度较大, 因此可以获得的数据比较少, 难以揭示地下水温度在垂向上的变化规律。

GM(1,1) 模型是目前使用最广泛的灰色预测模型, 基于随机的原始序列, 通过对系统因素进行关联分析, 并对原始数据进行生成处理, 使形成的新的数据序列具有较强的规律性, 然后建立相应的微分方程模型, 从而预测事物未来发展趋势状况。地下水温度随深度的变化是多种因素综合影响的结果, 可以把它看成一

个灰色过程。据大量观测数据表明, 在地温增温带, 受地热增温的控制, 地下水温度随着深度的增加而升高, 但其升高速率并不呈线性状态, 而是近似接近于指数曲线, 水温与埋深之间存在一定的规律^[1]。灰色 GM(1,1) 模型对模拟这种呈指数函数发展的曲线有很好的适用性^[7~8], 根据灰色理论, 结合实际技术手段可知, 观测得到的水温数列是在空间上连续的非等间距灰色数列, 因此, 在取得部分观测数据的情况下, 水温随埋深的变化过程可用灰色理论的相关建模方法建立非等间距序列 GM(1,1) 预测模型来模拟。

1 非等间距序列 GM(1,1) 模型

基于地下水温度随深度变化的规律与灰色数列的理论基础是一致的, 本文运用原始实测水温数据建立了非等间距序列 GM(1,1) 预测模型, 以及对模型的适用性进行了验证, 并将模型应用到观测井水温变化趋势预测中。

1.1 非等间距灰色序列预测地下水温度随深度变化的可行性

不同的地理环境、地质条件和地下深度有不同的地下水水温。地下水温度主要取决于地温的变化, 自地表向下可分为变温带、恒温带与增温带。日变温带深 1 ~ 2m、年变温带深 15 ~ 20m, 受太阳辐射的影响, 地下水温度随着地面空气温度的变化而变化。年恒温带埋深 20 ~ 30m, 太阳辐射的影响较弱, 地温变幅趋近于零, 地下水的温度与当地年平均气温相近。自 30m 向下为增温带, 主要由于地热的作用, 地下水温度会随着深度的增加而升高^[1]。

收稿日期: 2012-02-20; 修订日期: 2012-05-11

基金项目: 中国地质调查局“西安市地下温度场特征及其变化研究”

作者简介: 黄景锐(1987-), 女, 硕士研究生, 从事地下水科学与工程方面的研究。

E-mail: huangjingrui8709@163.com

恒温带向下,受地热增温的控制,地下水温度随着深度的增加呈近似接近于指数曲线形式状态升高,而灰色 GM(1,1)模型对模拟这种呈指数函数发展的曲线有很好的适用性,因此运用非等间距灰色数列预测地下水温度随深度的变化是可行的。

1.2 非等间距灰色序列预测的原理及 GM(1,1)模型

非等间距灰色序列预测不直接利用原始无规律数列来建立模型,而是把该数列作为基础,通过对其累加生成具有指数变化规律的数列,然后对这一新数列用微分方程来描述,求得其指数函数解,最终经累减生成,回复为原始数列。

非等间距序列 GM(1,1)模型是由一个只含单变量的一阶微分方程构成的。设序列:

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(k_1), x^{(0)}(k_2), x^{(0)}(k_3), \dots, x^{(0)}(k_n)\},$$

若间距 $\Delta k_i = k_i - k_{i-1} (i = 2, 3, \dots, n)$ 不等于常数,则称 $X^{(0)}$ 为非等间距序列。设序列:

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(k_1), x^{(1)}(k_2), x^{(1)}(k_3), \dots, x^{(1)}(k_n)\}, \text{ 若其中}$$

$$x^{(1)}(k_j) = \sum_{j=1}^i x^{(0)}(k_j) \Delta k_j, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

则称 $X^{(1)}$ 为非等间距序列 $X^{(0)}$ 的一次累加生成 (I-AGO) 序列。

由一阶生成模块 $X^{(1)}$ 建立 GM(1,1) 模型,白化微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b, t \in [0, \infty) \quad (2)$$

式中: a ——发展系数,控制系统发展态势的大小;

b ——灰色作用量,反映资料变化的关系。

根据最小二乘法原理,非等间距序列 GM(1,1) 模型中的参数向量为:

$$\Phi = [a \quad b] = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

其中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{x^{(0)}(k_2) \Delta k_2^2}{\ln x^{(1)}(k_2) - \ln x^{(1)}(k_1)} & \Delta k_2 \\ -\frac{x^{(0)}(k_3) \Delta k_3^2}{\ln x^{(1)}(k_3) - \ln x^{(1)}(k_2)} & \Delta k_3 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{x^{(0)}(k_n) \Delta k_n^2}{\ln x^{(1)}(k_n) - \ln x^{(1)}(k_{n-1})} & \Delta k_n \end{bmatrix},$$

$$Y = [x^{(0)}(k_2) \Delta k_2 \quad x^{(0)}(k_3) \Delta k_3 \quad \dots \quad x^{(0)}(k_n) \Delta k_n]^T$$

求出参数向量 Φ 后,将 a 和 b 的值代入式(2),解

微分方程,其中 $x^{(1)}(k_1) = x^{(0)}(k_1)$ 为初值,得式(2)的离散解为:

$$\hat{x}^{(1)}(k_{j+1}) = \left(x^{(1)}(k_1) - \frac{b}{a} \right) e^{-a(k_{j+1}-k_j)} + \frac{b}{a} \quad (4)$$

由式(4)模型预测的数列再经 IAGO (一次累减生成)处理,即可还原得到原始数据为:

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)} &= \frac{\hat{x}^{(1)}(k_{j+1}) - \hat{x}^{(1)}(k_j)}{\Delta k_{j+1}} \\ &= \frac{1}{\Delta k_{j+1}} (1 - e^{a(k_{j+1}-k_j)}) \left(x^{(1)}(k_1) - \frac{b}{a} \right) e^{-a(k_{j+1}-k_j)} \end{aligned} \quad (5)$$

1.3 非等间距序列 GM(1,1)模型精度检验

模型的预测精度有很多检验方法^[7],文中采用后验差。后验差是根据残差的均方差 S_2 与原始数列的均方差 S_1 的比值来判断的。设原始数列为 $\{x^{(0)}(k_i)\}$,预测数列为 $\{\hat{x}^{(0)}(k_i)\}$,其残差为:

$$\varepsilon(i) = x^{(0)}(k_i) - \hat{x}^{(0)}(k_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

原始数列平均值为:

$$\bar{x}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^{(0)}(k_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

残差平均值为:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} \varepsilon(i), i = 1, 2, \dots, n' \quad (8)$$

后验差比值为:

$$c = s_2/s_1 \quad (9)$$

小误差概率为:

$$p = p \{ |\varepsilon(i) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745s_1 \} \quad (10)$$

$$\text{其中: } s_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x^{(0)}(k_i) - \bar{x}^{(0)}]^2}$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{1}{n'-1} \sum_{i=1}^{n'} [\varepsilon(i) - \bar{\varepsilon}]^2}$$

按照 c 和 p 的计算结果,参照表 1 具体指标对模型精度进行评定。

表 1 模型精度评定指标

Table 1 Evaluation indexes of model precision

预测等级	p	c
一级:优	>0.95	<0.35
二级:良	>0.8	<0.5
三级:合格	>0.7	<0.65
四级:不合格	≤ 0.7	≥ 0.65

如果模型精度不合格,需要进行残差修正,残差修正时需要建立残差序列模型。残差序列模型的建立与上述建模方法类似,这里不再详述。

2 应用

本文采用西安市泾河开发区 3 号和 4 号观测井实

测水温数据为研究对象,2组数据均是通过使用 DCW—1 高精度多通道地温仪现场测量获得。

2.1 研究区概况

西安市泾河开发区 1 号~8 号井为“西安市浅层低温能调查评价”项目的井孔,3 号和 4 号井为观测井,其余为开采井。井孔位于西安市泾河开发区高陵石油产业园,井深均为 151.7m,呈“一”字型由西向东排列,由西向东依次编号为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]、8[#],井距均为 20m(图 1)。

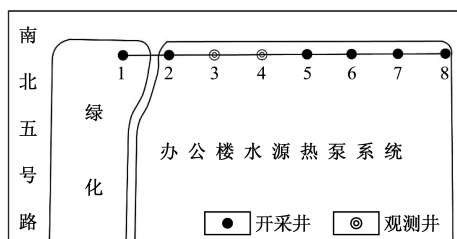


图 1 3 号、4 号观测井平面布置图

Fig. 1 Location of observation wells 3[#] and 4[#]

观测井所在区域位于西安凹陷东部,泾河与渭河交汇地带。总体地势西北高,东南低;南北高,中间低,在南北方向上具阶状地形特征。区域附近发育有大的东西向断裂,属渭河断裂带组分(图 2)。该区为松散岩类孔隙水区,浅层地下水(150m 以浅)有 2 层主要含水层,第一层为孔隙潜水含水层,含水层底板埋深 50m 左右,水位埋深约 16m,岩性以含砾中细砂为主,厚度约 20m。

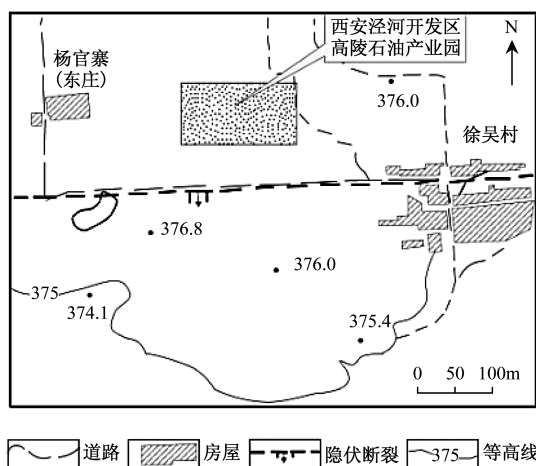


图 2 断裂带平面位置图

Fig. 2 Location of the fault

在统一降深 5m、统一钻孔口径 0.356m 条件下,单井出水量为 500~1 000 m³/d,属弱富水区。

第二层为孔隙承压含水层,含水层底板埋深 150m 左右,水位埋深约 50m,岩性以含砾细中砂为主,厚约 70m。在统一降深 10m 条件下,单井出水量可达 1 000~3 000 m³/d,属强富水区。区域浅层地下水水化学类型主要为 HCO₃·SO₄—Na·Mg 型,溶解性总固体 1438.7mg/L,总硬度 367.8mg/L,pH 值 7.9,水温为 15~18℃,并且止水深度越低,水温越高。

西安地区自地表 20m 以下为地温增温带,研究区位于西安凹陷东部,受地热增温与断裂的影响,该区浅层地下水温度随着埋深的增加而呈近似接近于指数函数曲线形式升高。由于一些客观因素的制约,无法取得更多数据来分析水温的变化趋势,基于 GM(1,1)预测模型具有不追求大样本容量、运算简便的优点,以及对模拟这种呈指数函数发展的曲线有很好的适用性的特点,可以用该模型预测研究区地下水温随深度的变化趋势。

2.2 地下水温度随深度变化趋势预测模型

2.2.1 模型的建立和检验

建立模型采用的原始数据如表 2 所示。

表 2 非等间距序列预测模型原始数据

Table 2 Virgin Sequence of non-equidistance grey sequence prediction

深度 k_j (m)	30	40	60	70	80	100	108
OW3 水温 (℃)	15.67	15.835	16.41	16.565	16.603	16.742	16.782
OW4 水温 (℃)	15.722	15.707	15.923	16.207	16.424	16.537	16.559

按照上述建立非等间距序列 GM(1,1)模型的方法,首先分别运用 3 号和 4 号观测井的 7 个实测水温数据求出参数 a 和 b 的值(表 3)。

表 3 参数 a 、 b 的值

Table 3 Values of parameters

观测井号	a	b
OW3	-0.0006	16.1204
OW4	-0.0009	15.6746

然后将参数代入式(5)中分别建立 2 口井的水温预测模型,最后将 50m、90m、110m、118m 和 120m 处的实测水温数据代入模型中进行拟合预测,对模型精度进行检验。

经计算得出 3 号和 4 号观测井的非等间距 GM(1,1)预测模型分别如式(11)和(12)所示。

$$\hat{x}^{(0)}(k_{j+1}) = \frac{(1 - e^{-0.0006(k_{j+1}-k_j)}) \times \left(15.67 + \frac{16.1204}{0.0006}\right) e^{0.0006(k_{j+1}-k_1)}}{\Delta k_{j+1}}$$

(11)

$$\hat{x}^{(0)}(k_{j+1}) = \frac{(1 - e^{-0.0009(k_{j+1}-k_j)}) \times \left(15.722 + \frac{15.6746}{0.0009}\right) e^{0.0009(k_{j+1}-k_1)}}{\Delta k_{j+1}}$$

(12)

式中： k_j, k_{j+1} ——埋藏深度(m)；
 $\hat{x}^{(0)}(k_{j+1})$ —— k_{j+1} 处的预测水温(℃)。
根据式(6)~(10)，分别计算出 3 号井预测模型的后验差比值 $c=0.294<0.35$ ，小误差概率 $p=1$ ；4 号井预测模型的后验差比值 $c=0.424<0.5$ ，小误差概率 $p=0.92$ 。参照表 1 可知，3 号井的预测模型精度优，4 号井的预测模型精度良。两口井具体水温拟合

结果见表 4。
由表 4 可见，3 号井计算结果中相对误差 $\leq \pm 2.17\%$ ，4 号井计算结果中相对误差 $\leq \pm 2.42\%$ ，两口井水温模拟值与实测值拟合效果较好。结合上述预测模型精度检验结果可知，将非等间距序列 GM(1,1) 预测模型应用到地下水温度随深度变化趋势研究中是切实可行的。

表 4 两口观测井 GM(1,1)模型水温拟合结果
Table 4 Simulation results of groundwater temperature for two observation wells

序号 j	深度 k_j (m)	OW3			OW4		
		实测值(℃)	模拟值(℃)	相对误差(%)	实测值(℃)	模拟值(℃)	相对误差(%)
1	30	15.670	15.670	—	15.722	15.722	—
2	40	15.835	16.178	-2.17	15.707	15.760	-0.34
3	50	16.056	16.276	-1.37	15.795	15.902	-0.68
4	60	16.410	16.374	0.22	15.923	16.046	-0.77
5	70	16.565	16.472	0.56	16.207	16.191	0.10
6	80	16.603	16.571	0.19	16.424	16.337	0.53
7	90	16.664	16.671	-0.04	16.485	16.485	0.00
8	100	16.742	16.771	-0.17	16.537	16.634	-0.59
9	108	16.782	16.862	-0.48	16.559	16.769	-1.27
10	110	16.923	16.913	0.06	16.607	16.845	-1.43
11	118	16.894	16.964	-0.41	16.548	16.921	-2.25
12	120	16.909	17.015	-0.63	16.596	16.997	-2.42

2.2.2 模型的应用

根据式(11)和(12)，分别预测 3 号和 4 号观测井 128m、138m、148m 和 150m 处的水温，具体预测结果见表 5。由图 3 和图 4 可见，两口观测井水温拟合效果较好；在预测深度范围内，两口井的水温均呈现随埋藏深度加大而上升的趋势。

表 5 两口观测井 GM(1,1)模型预测水温(℃)
Table 5 Prediction results of groundwater temperature for two observation wells

深度(m)	128	138	148	150
OW3 水温(℃)	17.066	17.158	17.261	17.324
OW4 水温(℃)	17.074	17.213	17.368	17.462

结合两口观测井所处区域的地质背景，对该水温变化趋势作出如下分析：研究区位于西安凹陷的东部，附近发育的东西向断裂为控热断裂，断裂构造沟通地下深部热量，为该区的地下热流奠定了良好的地质构造条

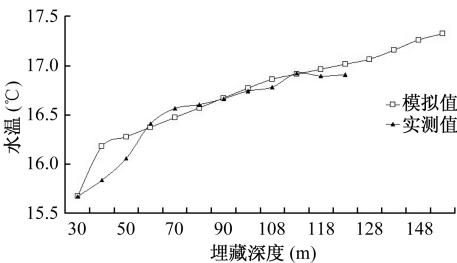


图 3 3 号井水温模拟及预测结果与实测值对比过程线
Fig.3 Comparison between the simulated groundwater temperature and the observed data at observation well 3#

件。这一大断裂构造中部又有很多次一级小断裂，断裂交汇部位基底岩石破碎，地热水循环条件良好^[9-10]。
另外，新近系、古近系地层上部沉积有较厚的松散地层，比热容高，热传导系数低，这样由地下深处传来的热量一般不易散失^[11]，因此，随着埋藏深度加大地下水温逐渐升高。

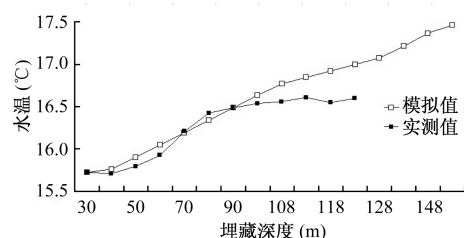


图4 4号井水温模拟及预测结果与实测值对比过程线

Fig.4 Comparison between the simulated groundwater temperature and the observed data at observation well 4#

3 结论

地下水温度随深度的变化是多种因素综合影响的灰色过程,本文根据西安市泾河开发区3号和4号观测井的实测水温数据建立了非等间距灰色序列 GM(1,1)模型,并对模型参数进行求解和对模型精度进行评定,并将该模型应用到两口观测井的水温预测中。通过分析得出以下结论:

(1)3号观测井的模型预测精度优,4号观测井的模型预测精度良,预测结果与实际值拟合好,由此可知此非等间距序列 GM(1,1)模型在预测地下水温度随深度变化的应用上具有较高的实用性。

(2)在实际工作中往往很难采集到等间距的数据,非等间距序列 GM(1,1)模型克服了一般灰色模型只能应用于等间距时序的弊病,满足了实际工作的需要。

(3)文中尝试运用非等间距序列 GM(1,1)模型对不同深度的水温进行预测的方法虽然可以为地下水温度纵向变化趋势的研究提供了一种新途径,但仅为初步研究,尚有很多方面需要进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] 谭显辉,丁力行. 地下水源热泵中的地下水分析[J]. 制冷与空调, 2003(4): 11-14. [TAN X H, DING L X. Analysis of Ground Water in the Groundwater Source Heat Pumps[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2003(4): 11-14. (in Chinese)]
- [2] Bohle Jugen, Klan Herbert. Design of Panel Heating and Cooling System[J]. ASHRAE Trans, 2000, 106(1): 677-683.
- [3] 薛玉伟,李新国,赵军,等. 地下水水源热泵的水源问题研究[J]. 能源工程, 2003(2): 10-13. [XUE Y W, LI G X, ZHAO J, et al. Research on underground water source heat pump's water source [J]. Energy Engineering, 2003(2): 10-13. (in Chinese)]
- [4] 王锦国,周志芳,金忠青. 地下水热量运移模拟的

- BEM—FAM耦合法[J]. 水利学报, 2001, 46(11): 71-76. [WANG J G, ZHOU Z F, JIN G Q. Coupled method of BEM—FAM for simulation of groundwater thermal transport [J]. Journal Of Hydraulic Engineering, 2001, 46(11): 71-76. (in Chinese)]
- [5] 周志芳,王锦国. 河流峡谷地区地下水温度异常特征分析[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 62-66. [ZHOU Z F, WANG J G. Abnormal characteristics analysis of groundwater temperature field in canyon areas[J]. Advances In Water Science, 2003, 14(1): 62-66. (in Chinese)]
- [6] 钮洪亮,乌效鸣. 地热勘探井测温技术研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(2): 65-67. [NIU H L, WU X M. Research and Application of thermometric technology of geothermal exploration [J]. Coal Geology And Exploration, 2008, 36(2): 65-67. (in Chinese)]
- [7] 易德生,郭萍. 灰色理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 69-144. [YI D S, GUO P. Grey Theory and Methods [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 69-144. (in Chinese)]
- [8] 戴文战,李俊峰. 非等间距 GM(1,1)模型建模研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005(9): 89-93. [DAI W Z, LI J F. Modeling Research on Non-equidistance in GM(1,1) Model [J]. Systems Engineering-Method and Practice, 2005(9): 89-93. (in Chinese)]
- [9] 王钧. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社, 1990: 59-63. [WANG J. The Basic Characteristics of Ground Temperature Distribution in China [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1990: 59-63. (in Chinese)]
- [10] 燕建龙,赵治海. 西安地区浅层地热能开发利用前景[C]//安全高效煤矿地质保障技术及应用会议论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 593-596. [YAN J L, ZHAO Z H. Development and Utilization of Shallow Geothermal Energy in Xi'an areas [C]//Conference Proceeding of Safety and High Efficiency Coal Mine Geological Guarantee Technology and Application. Beijing: Coal Industry Press, 2007: 593-596. (in Chinese)]
- [11] 周彦章,周志芳,吴蓉,等. 地源热泵系统地下水热量运移阶段特性模拟研究[J]. 水文地质与工程地质, 2011, 38(5): 128-134. [ZHOU Y Z, ZHOU Z F, WU R, et al. Simulation Study of the stage—characteristics of groundwater thermal transport in aquifer medium for GWHP System [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 128-134. (in Chinese)]

(下转第57页)

Finite element analysis of pile stress in static pressure pile installation

YUE Zhu-wen^{1,2}, LI Jing-pei^{1,2}, DENG Wen-yan³, YANG Bo^{1,2}

- (1. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
2. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;* 3. *WEGO Engineering Co., Ltd, Shanghai 201203, China*)

Abstract: The interaction process of pile-soil is severe in pile installation. In the pile installation process, pile stress conditions have an important influence on pile bearing capacity and durability. In this paper, finite element method is used to carry out numerical simulation of the pile installation process through the displacement control method. The whole process analysis of pile stress is realized with simulation calculation of pile-soil radial compression and vertical friction. The results show that pile bears vertical compressive stress mainly in the process of pile sinking. Especially, the vertical compressive stress becomes bigger in the end of pile installation. The single factor control method is used to analysis the influence of various factors on pile stress, and the correlation and sensitivity analyses are performed. Analyses show that the pile stress has a positive correlation with the friction coefficient, internal friction angle, cohesion and pile-point angle in the process of pile installation, and is negatively correlated with the pile diameter. Pile-point angle has weak sensitivity to pile stress.

Key words: static pressure; pile installation; vertical stress; pile side friction; numerical simulation

责任编辑:张明霞

(上接第52页)

Prediction of shallow groundwater temperature based on GM(1,1) model for non-equidistant sequence

HUANG Jing-rui¹, HU An-yan¹, ZHANG Huan-chu¹, LI Xia²

- (1. *School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;*
2. *School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China*)

Abstract: The groundwater temperature, which is related to the selection of heat exchanger and the whole system optimization design, is an important parameter for design of groundwater source heat pump system. Periodical monitoring of groundwater temperature in each layer in the geothermal well prospecting and utilization and predicting the changes in groundwater temperature with depth are very important in providing reference information for design and operation of groundwater source heat pump system and for well completion technology and other processes. Based on the groundwater temperature data measured in depths from 30 to 108m of two observation wells in Xi'an Jinghe development zone, a GM(1,1) model for a non-equidistant sequence is established to forecast the change trend of groundwater temperature in depths from 128 to 150m based on grey theory. The result shows that the model can forecast the change trend of groundwater temperature with depth. It is a new method for the study of the vertical change in groundwater temperature.

Key words: GM(1,1) model for non-equidistant sequence; groundwater temperature; tendency prediction

责任编辑:汪美华