

水源热泵影响地下水温度主控因素关联度分析

陈文芳¹, 杜尚海², 陈蕾¹, 袁梦丽¹

(1. 河南省地质矿产勘查开发局 第一地质环境调查院, 河南 郑州 450045;

2. 吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021)

摘要: 为研究地下水源热泵长期影响下, 地下水温度主控因素的变化特征, 选择安阳市第五人民医院为研究区, 将地下水温度作为典型的灰色系统进行研究, 采用灰色关联度的计算方法进行地下水温度、地下水埋深、气温、降水量以及回水井水温之间的关联度分析, 获取地下水温度变化的主控因素。研究结果表明: 在不受水源热泵影响时, 地下水埋深是地下水温度的主控因素。在水源热泵影响下, 地下水温度受气温、降水量、地下水埋深和回水井水温的共同影响; 在垂向上, 回水井水温对监测井水温的影响程度随着深度的增大而逐渐降低, 地下水温度的主控因素由回水井水温转变为地下水埋深, 在水平方向上, 回水井水温对监测井水温的影响程度随着距离的增大而逐渐减小, 地下水温度的主控因素由回水井水温转变为气温和地下水埋深。

关键词: 水源热泵; 地下水温度; 主控因素; 关联度分析

中图分类号: TV138; TU833

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0158-05

Correlation analysis on the main control factors of groundwater temperature under the influence of groundwater source heat pump

CHEN Wenfang¹, DU Shanghai², CHEN Lei¹, YUAN Mengli¹

(1. No. 1 Institute of Geo-environment Survey, Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and

Mineral Development, Zhengzhou 450045, China; 2. Key Laboratory of Groundwater

Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to study the variation characteristics of the main control factors of groundwater temperature under the long-term influence of ground source heat pump, Anyang 5th People's hospital was chosen as the study area and the temperature field of groundwater was treated as a grey system. The study uses grey relational calculation method to analyze relation among groundwater temperature, groundwater depth, temperature, precipitation and water temperature of recharge wells, and to gain the main control factor of groundwater temperature. Results show that groundwater depth is the main control factor without the influence of groundwater source heat pump, while temperature, precipitation, groundwater depth and water temperature of recharge well would corporately affect the groundwater temperature under the influence of groundwater source heat pump; the influence of water temperature of recharge wells on the water temperature of the monitoring wells decreases with the increase of the depth vertically, and the main control factor of the groundwater temperature would change from water temperature of recharge well to groundwater depth, while the influence of the water temperature of recharge wells on the water temperature of the monitoring wells decreases with the increase of the distance horizontally, and the main control factor would change from water temperature of recharge well to temperature and groundwater depth.

Key words: ground source heat pump; groundwater temperature; the main control factors; correlation analysis

地下水源热泵系统 (groundwater source heat pump, 简称 GSHP) 是一种利用浅层地热能进行制

冷和供暖的采能技术,20世纪40年代最早出现于美国,由于其环境效益显著,运行效率较高,在欧洲及美国迅速发展^[1-3]。河南省安阳市自2001年引进该技术,目前已有40多家使用^[4]。地下水源热泵系统主要以地下水为介质进行热量传递,热泵系统在运行期间,需抽灌地下水完成热量转移,必然会对地下水温度造成一定的影响^[4-5]。

为分析地下水源热泵系统开发利用对地下水温度产生的影响,国内外多位学者采用水热耦合数值模拟的方法和定量化的手段,对地下水源热泵系统的地下水流场和温度场进行模拟,分析不同抽回灌模式下的地下水流场和温度场的演化规律,分析最合理的井距、抽注水轴线与地下水流的角度及抽注层面选择等方案^[6-9],研究表明,地下水源热泵系统不同工况、不同抽回灌井模式和布局条件下,均会对地下水温度场造成一定的影响,但对于水源热泵系统回灌水长期回灌条件下,地下水温度主控因素是否发生变化及变化规律的研究尚未涉及。本文根据安阳市第五人民医院地下水源热泵监测资料,应用灰色关联度的理论和方法,通过分析计算地下水温度变化与地下水位埋深、回灌水水温、气温和降水量等因素变化的相关性,分析地下水源热泵影响下,地下水温度主控因素的变化,这些对地下水源热泵的长期有效运行具有重要意义。

1 研究区概况

安阳市第五人民医院位于河南省安阳市梅东路与文明大道交叉口东北角,该地下水源热泵工程共设抽水井2眼,回水井2眼,备用井1眼,井间距30m,监测井井位及井间距见图1,运行模式为两抽两回(图1)。该系统主要用于冬季供暖和夏季制冷,冬季运行时间多为11月15日至次年的3月15日,运行约120d,回灌水温度13℃左右;夏季运行时间多在5月20日至9月12日,运行约115d,回灌水温度20℃左右。

研究区属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量573.6mm。研究区位于洹河冲洪积扇上游,地下水源热泵主要开采层和回灌层为100m以上浅含水层,岩性以中、上更新统的冲洪积卵砾石、砾石和中粗砂为主,厚度30m左右,地下水补给及赋存条件优越、富水性和回灌能力较强,换算成5m降深,单井出水能力>5000m³/d,单井回灌能力>3000m³/d,含水层调节能力强(图2)。区内包气带岩性以杂填土、粉土、粉质黏土为主,地形

平坦,地表径流缓慢,有利于大气降水入渗补给,大气降水补给是该区地下水的主要补给来源。

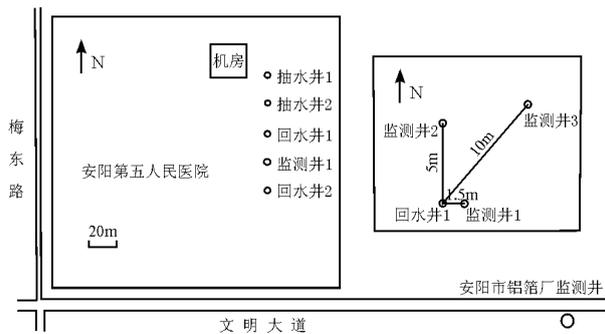


图1 安阳市第五人民医院抽回灌井及分层监测井分布

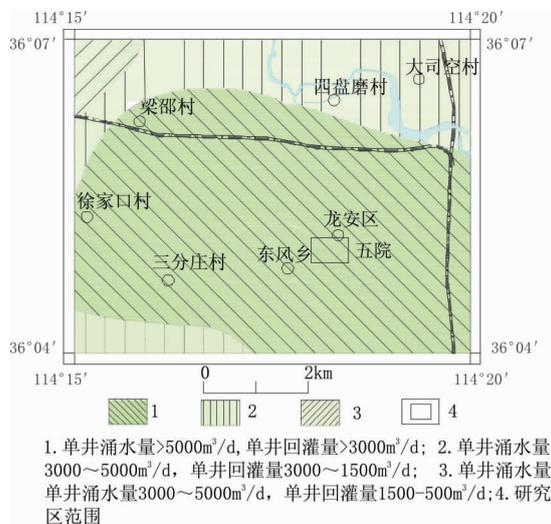


图2 综合水文地质图

2 地下水温度动态特征分析

2.1 不受水源热泵影响时地下水温度动态特征分析

为研究地下水温度不受水源热泵回灌水影响时的主控因素,选取安阳市铝箔厂监测井作为研究对象,对地下水温度、地下水位埋深和气温进行监测,监测频率1次/5d,监测时间2008年6月至2014年6月。

取地下水温度多年平均值,做地下水温度年内变化曲线(图3),由图3可以看出,地下水温度在年内表现为“下降-上升-下降”趋势,波动范围14.20~15.20℃之间,在1-2月份略有下降,2月份达到最低值14.23℃,3月份气开始上升,7月份达到最高值15.13℃,之后开始下降,到12月末回落到年初的温度,明显地反映出地下水位埋深、气温变化等因素对浅层地下水温度变化的影响。取资料系列长度的平均水温值,做地下水温度多年变化曲线(图4),由图4可以看出,地下水温度呈波动状

态,没有明显的上升或者下降状态;地下水温度各年年内变化与多年平均年内变化一致,但各年年内温度变化幅度差异明显。

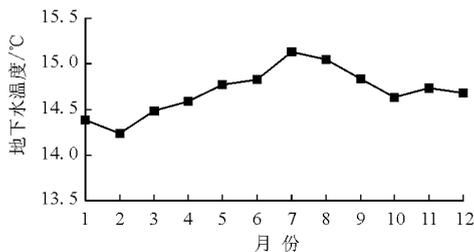


图3 安阳市铝箔厂监测井地下水温度年内变化曲线

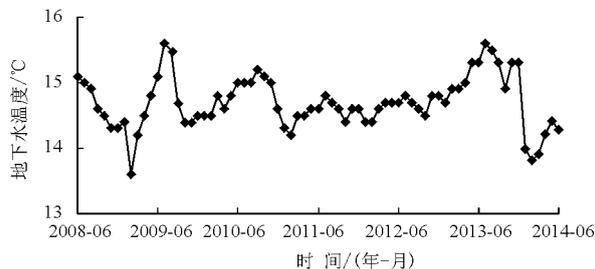
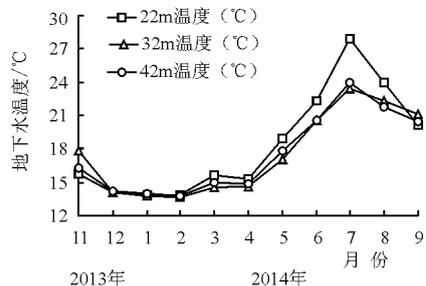


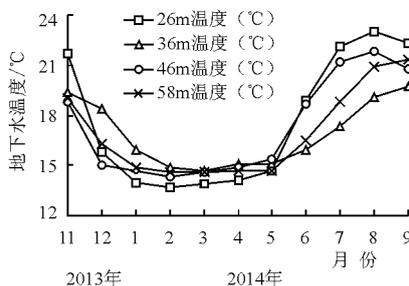
图4 安阳市铝箔厂监测井地下水温度多年动态变化曲线

2.2 水源热泵影响下地下水温度动态特征分析

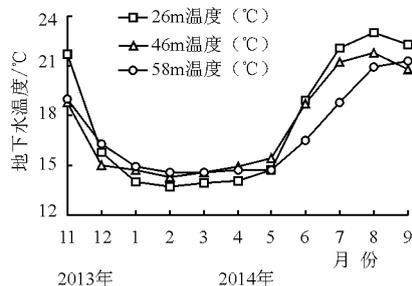
为研究水源热泵影响下地下水温度的主控因素变化,选取安阳市第五人民医院为研究对象,在1号回水井周边施工3眼分层监测井,分别对地下水位和不同层的地下水温度进行长期监测,同时对气温进行监测,监测频率1次/5d,各监测井的相对位置,见图1。1号监测井距离1号回水井1.5m,地下水温度监测深度分别为22、32和42m;2号监测



(a) 1号监测井



(b) 2号监测井



(c) 3号监测井

图6 安阳市第五人民医院监测井水温动态曲线

2.3 地下水温度影响因素的确定

影响地下水温度的因素主要有热源、地层岩性、地质构造、地形地貌、气象水文、水文地质条件及人类活动等^[10-12]。研究区面积较小,地层岩性、地质构造、地形地貌及水文地质条件比较稳定,对地下水温度变化影响不大,且这些因素随时间变化极小。因此,不受水源热泵影响时,地下水温度的影响因素可

井距离1号回水井5m,地下水温度监测深度分别为26、36、46和58m;3号监测井距离1号回水井10m,地下水温度监测深度分别为26、36和48m。监测时间为2013年11月15日至2014年9月12日,包含了1个供暖期、1个间歇期和1个制冷期。

从回水井水温变化曲线(图5)可以看出,地下水温度在监测时间内表现为“下降-上升-下降”趋势,受回灌水温度影响,在供暖期内,地下水温度呈显著下降趋势,间歇期内,地下水温度开始回升,到制冷期,地下水温度呈现显著上升趋势,制冷期结束后,地下水温度开始下降。

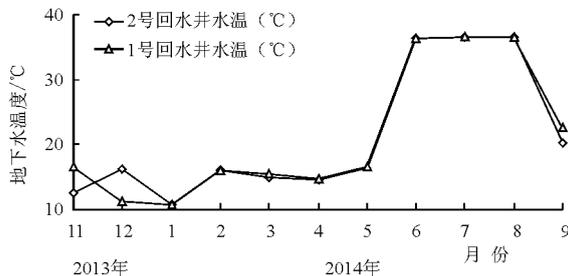


图5 安阳市第五人民医院回水井水温动态曲线

从1号、2号、3号监测井不同层位地下水温度变化曲线(图6)可以看出,3个监测井不同层位的地下水温度变化趋势与两个回水井基本一致,在供暖期内,地下水温度呈显著下降趋势,间歇期内,地下水温度开始回升,到制冷期,地下水温度呈现显著上升趋势,制冷期结束后,地下水温度开始下降,明显反映出地下水温度受回水井水温的影响。

确定为降水量、气温、地下水位埋深;在水源热泵影响下,地下水温度的影响因素可确定为降水量、气温、地下水位埋深及回水井水温。

3 地下水温度主控因素的关联度分析

3.1 灰色关联度分析的原理

灰色系统理论和方法是我国学者邓聚龙于20

世纪 80 年代提出的^[13], 主要用于过程控制和预测, 已被广泛应用于地下水科学各个方向的研究工作中, 均取得了较好的研究成果^[14-16], 在地下水水温动态变化影响因素的关联度分析中亦被应用^[10]。

对地下水水温系统而言, 长期监测所获得的地下水水温、水位埋深以及气温、降水资料是已知信息, 而由于开采条件变化、地下水源热泵回灌水等人类活动造成地下水补、径、排条件改变, 而引发地下水水温变化等属未知信息, 因此属于典型的灰色系统。因此可将地下水温度场作为典型的灰色系统进行研究, 采用灰色关联度的计算方法进行地下水温度、地下水位埋深、气温、降水量以及回灌水之间的关联分析, 分析地下水温度变化最主要的控制因素。

设 $X_0(k)$ 、 $X_1(k)$ 、 $X_2(k)$ 和 $X_3(k)$ 分别表示各计算时期内地下水温度、水位埋深、气温和降水量的时间序列, 则灰色关联度的计算过程如下:

(1) 指标归一化: 由于计算的各指标量纲不同, 为便于分析需要进行归一化处理, 即用每个序列中的最大值除以该序列的每个数, 得到新的序列;

(2) 关联系数计算: 利用公式(1) 分别计算地下水温度序列和地下水位埋深、降水量和气温序列的关联系数:

$$L_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta_{\max}} \quad (1)$$

式中: $L_{0i}(k)$ 为 k 年份与地下水温度的关联系数; Δ 为比较序列间同一年份 k 的绝对差值; Δ_{\min} 为最小差值; Δ_{\max} 表示最大差值; ρ 为分辨系数, 取值介于 0 和 1 之间, 其大小不影响各时刻关联系数的序, 一般取 0.5。

(3) 关联度计算: 关联度是各时刻关联系数的平均值, 计算公式为:

$$\gamma_{0i} = \frac{\sum_{j=1}^n L_{0i}(k_j)}{n} \quad (2)$$

式中: γ_{0i} 为两个序列之间的关联度; n 为比较序列的长度。

3.2 结果分析

不受水源热泵影响时, 安阳市铝箔厂监测井地下水温度的灰色关联度大小依次为: 地下水水位埋深 > 气温 > 降水量 (表 1), 地下水位埋深是地下水温度变化主控因素。

表 1 安阳市铝箔厂地下水温度灰色关联度计算结果

地下水温 - 水位埋深	地下水温 - 气温	地下水温 - 降水量
0.8829	0.6331	0.4182

在水源热泵影响下, 1 号监测井 22 m 和 32 m 深度地下水温度灰色关联度大小依次为: 1 号、2 号回水井水温 > 气温 > 地下水位埋深 > 降水量, 地下水温度的主控因素是 1 号、2 号回水井水温; 42 m 深度灰色关联度大小依次为: 地下水位埋深 > 1 号、2 号回水井水温 > 气温 > 降水量, 地下水温度变化的主控因素是地下水位埋深。2 号和 3 号监测井各深度地下水温度关联度与 1 号监测井变化类似, 且地下水温度与回水井水温之间的关联度随着距离的增大逐渐减小, 1 号、2 号回水井水温对地下水温度的影响逐渐减小, 已不是主控因素 (表 2, 图 7)。

表 2 1 号监测井地下水温度灰色关联度计算结果表

监测井 编号	深度 / m	气温	降水量	1 号回水井温度	2 号回水井温度	水位埋深
1 号	22	0.6696	0.4771	0.6885	0.6835	0.5505
	32	0.6620	0.4712	0.6656	0.6656	0.6599
	42	0.6370	0.4587	0.6427	0.6408	0.7082
2 号	26	0.6662	0.5061	0.6921	0.6918	0.6788
	36	0.6357	0.4744	0.6131	0.6097	0.6913
	46	0.6483	0.4733	0.6555	0.6546	0.7048
	58	0.6245	0.4711	0.6285	0.6265	0.7150
3 号	26	0.6820	0.4858	0.6446	0.6437	0.5769
	36	0.6546	0.4734	0.6298	0.6251	0.7439
	48	0.6344	0.4704	0.6209	0.6181	0.8625

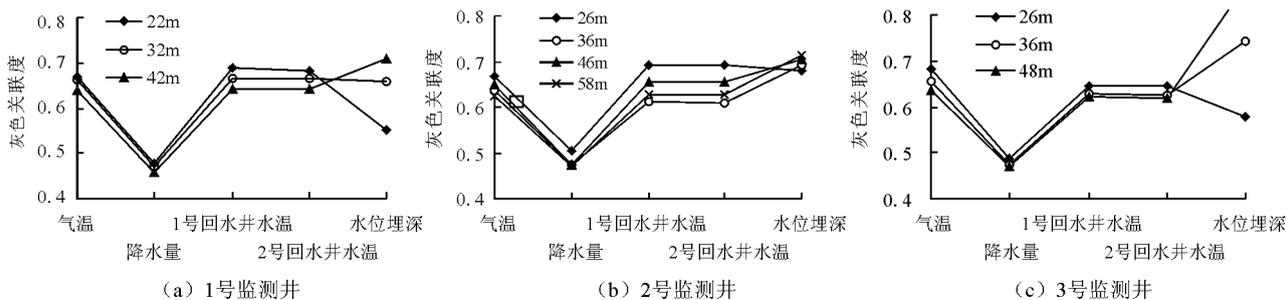


图 7 地下水温度灰色关联度分布图

由表2和图7可以看出,在垂向上,地下水温度与回水井水温之间的关联度随着深度的增大逐渐减小,回水井水温对监测井水温的影响程度随着深度的增大而逐渐降低,地下水温度的主控因素由回水井水温转变为地下水位埋深;在水平方向上,地下水温度与回水井之间的关联度随着距离的增大而逐渐减小,回水井水温对监测井水温的影响程度随着距离的增大而逐渐减小,地下水温度的主控因素由回水井水温转变为气温和地下水位埋深。

4 结 论

(1)不受水源热泵影响时,地下水温度在年内表现为“下降-上升-下降”趋势,多年温度呈波动状态,明显地反应出地下水位埋深、气温变化等因素对浅层地下水温度变化的影响,灰色关联度分析结果表明:地下水位埋深是地下水温度变化主控因素。

(2)在水源热泵影响下,3个监测井不同层位的地下水温度变化趋势与两个回水井基本一致,地下水温度受气温、降水量、地下水位埋深和回灌水温度的共同影响,灰色关联度分析结果表明:在垂向上,回水井水温对监测井水温的影响程度随着深度的增大而逐渐降低,地下水温度的主控因素由回水井水温转变为地下水位埋深,在水平方向上,回水井水温对监测井水温的影响程度随着距离的增大而逐渐减小,地下水温度的主控因素由回水井水温转变为气温和地下水位埋深。

参考文献:

- [1] Gerald W H. Geothermal heat pumps: an increasingly successful technology [J]. *Renewable Energy*, 1998,10(2): 481-488.
- [2] Sanner B, Karytsas C, Mendrinis D, et al. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe [J]. *Geothermics*, 2003,32(4): 579-588.
- [3] Omer A M. Ground source heat pumps systems and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(2):344-371.
- [4] 赵云章,闫振鹏,刘新号,等.河南省城市浅层地热[M].北京:地质出版社,2010.
- [5] 廖荣,丁跃元,刘立才,等.水源热泵系统应用对地下水环境的影响[J]. *水资源保护*,2010,26(2):92-96.
- [6] 刘立才,王理许,丁跃元,等.水源热泵抽灌井布局及其运行过程中地下温度变化[J]. *水文地质工程地质*, 2007,34(6):1-5.
- [7] 王慧玲,王峰,孙保卫,等.地源热泵系统抽回灌模式对地下水流场和温度场的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2009,36(5):133-137.
- [8] 胡继华,张延军,于子望,等.水源热泵系统中地下水流通及其对温度场的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,2008,38(6):992-998.
- [9] 窦明,张彦,米庆彬,等.地温空调井布局方式对地下水流场和温度场的影响分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*,2014,35(5):124-128.
- [10] 方燕娜,廖资生,陈洪艳,等.吉林中部平原区地下水温度动态变化影响因素的关联度分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,2006,36(1):66-72.
- [11] 瞿成松,陈海洋,曹袁,等.上海第四纪地层温度场分布特征与影响因素分析[J]. *上海国土资源*,2013,34(3):73-76.
- [12] 郑桂森,卫万顺,栾英波.浅层地温能资源影响因素研究[J]. *中国科技成果创新交流*,2012(20):33-35.
- [13] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.
- [14] 李娟,杨洋,杨昱,等.灰色关联度分析在地下水污染源强定量评价中的应用[J]. *安全与环境学报*,2015,15(4):342-348.
- [15] 许峰,秦成.地下水环境质量评价-基于粗糙集理论和灰色关联系数矩阵的TOPSIS模型[J]. *南水北调与水利科技*,2015,13(6):1097-1100.
- [16] 麦麦提·吐尔逊艾则孜,海米提·依米提,孙慧兰,等.伊犁河流域土壤盐分与地下水关系的关联分析[J]. *土壤通报*,2013,44(3):561-566.