

水源热泵系统应用对地下水环境的影响

廖荣¹, 丁跃元², 刘立才³, 罗遵兰⁴

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083 ; 2. 北京市水务局, 北京 100038 ; 3. 北京市水利科学研究所, 北京 100044 ; 4. 中国环境科学研究院生态环境研究所, 北京 100012)

摘要 根据地下水动力学原理、热传递数值模拟技术和热泵系统场地地下水环境的实测数据, 推导热泵系统运行过程中抽灌井群引起的地下水动力场范围, 定量计算热泵运行起始期、建筑物年内冷热负荷失衡等情况的地温场变化, 分析热泵系统运行对地下水水质、细菌的影响。结果表明 年内冷热负荷平衡有利于热泵系统的长期运行 当冷负荷大于热负荷时, 热泵起始期应在冬季, 反之, 起始期应选在夏季 热泵系统运行过程中, 对地下水水质影响不大, 温度变化会抑制细菌的生长。

关键词 地下水热泵系统 地温场 地下水水质 细菌

中图分类号 TP314.2 X82 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2010)02-0092-05

Impact of water source heat pump system on groundwater environment

LIAO Rong¹, DING Yue-yuan², LIU Li-cai³, LUO Zun-lan⁴

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China ; 2. Beijing Water Authority, Beijing 100038, China ; 3. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China ; 4. Research Institute of Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract : Based on the principles of groundwater dynamics, a numerical simulation technique of thermal transmission, and field measurement data of the groundwater environment in the field where the heat pump system was settled, the groundwater hydrodynamic field was determined when the pump-injection wells performed. The change of the geo-temperature field was quantitatively calculated during different performance periods, such as at the beginning of heat pump operation, and during the non-equilibrium state of cooling and heat loading inside the building throughout the year. The effect of heat pump operation on the groundwater quality and the bacteria was also analyzed. The results showed that a heat pump would perform for the long-term when the cool and warm load was in equilibrium. If the cool load was greater than the heat load, the initial operating period should be in winter. Otherwise, the initial performance period should be in summer. The heat pump performance had little effect on groundwater quality and restrained the growth of bacteria.

Key words : groundwater heat pump system ; geo-temperature field ; groundwater quality ; bacteria

地下水源热泵空调系统是一种利用浅层地热能进行制冷和供暖的采能技术,最早出现于美国 20 世纪 40 年代,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]。我国于 20 世纪末引入该技术,在北京、上海及广州等地得到了推广应用。据不完全统计,仅北京地区的水源热泵空调系统已达 400 余家,服务建筑面积达 400 万 m²。地下水源热泵系统主要由地下水抽灌井、水源热泵机组和室内空调

终端组成,以地下水为介质进行热量传递,形成抽灌井间水热循环、热泵机组水热循环及室内空调水热循环等三个水-热耦合循环。在夏季制冷期,热泵系统将室内热量转入地下水,在冬季供暖期则利用地下水热量为室内供暖。热泵系统在运行期间,需抽灌地下水完成热量转移,对抽灌区的地下水动力场、地温场及地下水水质等方面会造成一定影响。笔者根据北京市多个地下水源热泵空调系统相关资料,对热泵系

作者简介 廖荣(1980—),男(壮族),广西百色人,工程师,硕士研究生,研究方向为水土资源及环境。E-mail :Liao0849@sina.com

统运行过程中地下水动力场影响范围、地温场变化、地下水水质及细菌变化进行分析研究。

1 地下水动力场影响范围的确定

热泵系统的运行对地下水环境最直接的影响为地下水流场和温度场的变化。含水层热量传递方式主要为热对流和热传导,地下水的导热率约为 $0.6\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$,低于含水层介质的,单纯地下水的导热作用对热量传输的贡献不大。但地下水的比热较大,是良好的天然载热流体。在地下水流动较为活跃的地区,地下水的对流作用十分显著,对区域地温场的分布起着主导作用^[2-6]。因此,估算出地下水抽灌引起的水动力场影响范围,即可判断分析地下温度场的影响范围。

地下水水源热泵系统一般为群井抽灌,在等量抽灌的条件下,利用地下水动力学中的泰斯井流和叠加原理可计算出抽灌井群的地下水动力场影响范围。假定热泵应用场的抽水井数为 n ,回灌井数为 m ,地下水抽灌循环量为 $Q\text{ (m}^3/\text{d)}$ 。因地下水抽灌要求同层回灌,不论抽灌井穿过几个含水层,均可以根据各含水层的渗透系数和厚度,求得利用含水层的等效渗透系数,等效渗透系数与含水层总厚度的乘积即为等效导水系数 $T_e\text{ (m}^2/\text{d)}$ 。假定场地等效含水层的弹性贮水系数为 μ ,场地任一点距第 i 眼抽水井的距离为 $r_i\text{ (}i=1,2,3,\cdots,n\text{)}$,距第 j 眼回灌井的距离为 $R_j\text{ (}j=1,2,3,\cdots,m\text{)}$ 。根据泰斯井流公式,第 i 眼抽水井作用于场地任一点的水位降深为

$$S_i = \frac{Q}{4\pi T_e n} W(u)$$

其中

$$u = \frac{r_i^2 \mu}{4 T_e t}$$

$$W(u) = \ln \frac{2.25 T_e t}{\mu r_i^2}$$

则

$$S_i = \frac{Q}{4\pi T_e n} \ln \frac{2.25 T_e t}{\mu r_i^2}$$

根据叠加原理,所有抽水井作用于任一点处的水位总降深为

$$S_P = \sum_{i=1}^n S_i = \frac{Q}{4\pi T_e n} \ln \left[\left(\frac{2.25 T_e t}{\mu} \right)^n \prod_{i=1}^n r_i^{-2} \right]$$

假定抽水与回灌同步,二者之间没有时间差,依然根据叠加原理,所有回灌井作用于任一点处的水位总降深为

$$S_I = \sum_{j=1}^m S_j = \frac{-Q}{4\pi T_e m} \ln \left[\left(\frac{2.25 T_e t}{\mu} \right)^m \prod_{j=1}^m R_j^{-2} \right]$$

再根据叠加原理,所有抽水井和回灌井作用于场地任一点处的水位总降深为

$$S = S_P + S_I = \frac{Q}{2\pi T_e} \ln \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m R_j} \Big/ \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n r_i}$$

根据推导出的水位总降深 S 公式,其中没有时间 t 与弹性贮水系数 μ 项,这表明,因地下水抽灌平衡,没有消耗地下水资源的储存量,抽灌过程中抽灌场地的地下水动力场是稳定的。由任一点的水位总降深公式,可利用相关软件绘制抽灌场地的水位降深等值线图。根据水位总降深 S 公式,距离抽灌场地越远,任一点距抽水井的距离与距回灌井的距离趋于相等, $\lim_{r, R \rightarrow \infty} S = 0$,为此,抽灌场地的地下水动力场影响范围以多大的降深值为界限值得关注。一般可以认为,以 $\pm 5 \sim 10\text{ cm}$ 为界限较为适宜。

如果抽出的地下水不能实现完全回灌,消耗了地下水储存量,则抽灌场地任一点处的水位降深将与热泵系统运行时间 t 、含水层的释水系数 μ 有直接关系,地下水抽灌引起的地下水动力场的影响范围将大于等量抽灌条件下的影响范围。

根据上述推导出的抽灌场地水位降深计算公式,以北京市亦庄经济技术开发区水源热泵空调系统为研究对象,进行了观测井的水位降深验证,计算降深与实测降深基本一致。该项目为两抽三灌,共有 5 组观测井,以 2# 观测井为例,该井与抽水井距离分别为 41 m、94 m,与回灌井距离分别为 64 m、37 m、30 m,其水位变幅计算值为 20 cm,实测值为 17 cm。

2 对地下温度场的影响

热泵系统运行周期分为 4 个阶段,即夏季制冷期、间歇期、冬季供暖期、间歇期,地下水温度随着运行阶段的变化也将发生周期性的上升和下降。北京市海淀区某地下水源热泵项目为一抽两灌,抽水井与 1# 回灌井的距离为 50 m,与 2# 回灌井的距离为 20 m。冬季利用 1# 回灌井回灌,夏季利用 2# 回灌井回灌。根据运行过程中蒸发器、冷凝器进出水的温度监测数据,在冬季供暖期,热泵系统从地下提取热量,使地下水回水的温度降低,进而使含水层的温度降低。由于抽灌井之间的距离较大,低温回灌水基本没有影响到抽水井,抽水井的温度一直保持在 14.5°C 左右(图 1)。而在夏季制冷期,热泵系统将建筑物内的热量转移进含水层,致使地下水回水温度升高,因抽灌井之间的距离较短,在短时间内就发生了“热突破”现象,抽水井的温度随着回灌井温度的升高而升高(图 1)。

根据热泵系统不同运行阶段对地下水温度的影响,进一步认为,热泵系统初始运行期是夏季还是冬季,制冷期注入地下的热量与采暖期自地下采出的

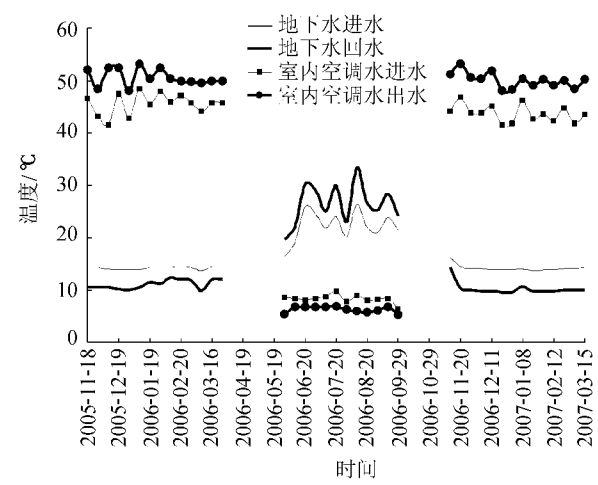


图1 地下水进出口和室内空调水进出口温度变化

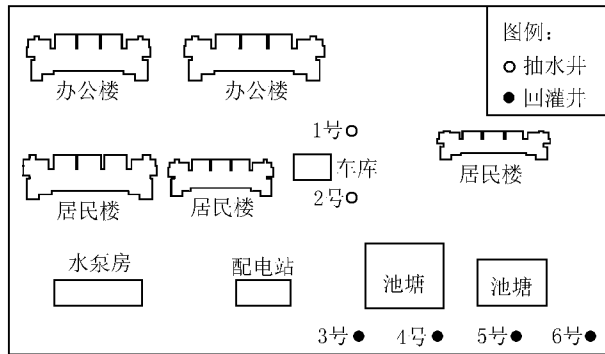


图2 北京市丰台区某水源热泵抽灌井分布示意图

热量是否平衡,直接影响热泵应用场地地下温度场的变化,并极有可能影响到热泵系统的运行效率。由于缺乏长期观测资料,采用热传递数值法模拟预测上述各种情况的地下温度场变化。现以北京市丰台区某水源热泵空调系统为研究对象,采用有限差分法(FDM)数值模拟方法^[7],选用 HST3D 模拟软件,模拟预测不同运行工况下 10 a 运行期的地下温度场变化。HST3D 软件可模拟地下水渗流、溶质运移和热传递^[8],在研究北京市经济技术开发区某水源热泵空调系统场地的地下温度场变化时会使用过^[9],验证了该软件的正确性。

丰台区某水源热泵空调系统主要用于办公区和生活区的制冷和供暖,该项目共有 2 个抽水井,4 个回灌井,抽灌井布局如图 2 所示。冬季供暖负荷为 1 790 kW,两抽四灌,抽灌量为 5 280 m³/d,运行时间为 120 d。夏季制冷负荷为 740 kW,一抽(1 #)两灌(3 #、4 #),抽灌量为 2 184 m³/d,运行时间为 90 d。项目场区第四系地层厚度为 72.5 m,地层呈中粗砂、砂砾石与粉质黏土交互,共有 5 个含水层,含水层的总厚度为 34 m,下部隔水层为寒武系页岩。场地的地下水静水位埋深为 17.5 m。水文地质与热力学参数主要根据相关文献及当地的抽水试验数据和热力学试验结果选取,自上而下各地层参数见表 1。根

据这些参数,可直接模拟预测不同工况下的地下温度场变化。

表1 各地层水文地质参数

岩性	渗透率/ m ²	有效 孔隙度	纵向弥 散度/m	横向弥 散度/m	比热容/ (J·m ⁻³ ·℃ ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
粉质黏土	1.2×10 ⁻¹³	0.10	0.6	0.2	3.2×10 ⁶	1.0
中砂	1.2×10 ⁻¹¹	0.15	2.0	0.4	1.4×10 ⁶	0.8
粗砂	3.6×10 ⁻¹¹	0.20	2.4	0.6	1.5×10 ⁶	0.8
砂砾石	6.0×10 ⁻¹¹	0.20	2.8	0.8	1.5×10 ⁶	0.8
页岩	1.2×10 ⁻¹⁷	0.05	0.5	0.2	4.0×10 ⁶	1.8

数值模拟结果表明,热泵系统起始运行期的选择及年内冷热量是否平衡对抽灌区地温场具有重大影响,对热泵系统的现实应用具有趋利避害的重要指导作用。

模拟工况 1:假设热泵系统冷热负荷均为 1 790 kW,供暖期与制冷运行时间相等,抽灌量均为 5 280 m³/d,地下水温度初值为 15℃。分别以冬季供暖期及夏季制冷期为起始运行期,模拟热泵系统运行过程中应用场地地温场的历时变化,模拟结果如图 3。由图 3 可见,热泵系统的起始运行期对地温场的影响主要表现为,如果起始运行期为冬季供暖期,则在后期运行中,地温场的平均温度低于背景值 15℃,而起始运行期为夏季时,则高于背景值 15℃。此外,建筑物所需冷热量平衡条件下,热泵系统在长期运行过程中,地温变化在高低循环往复中较为平稳,未呈现出趋冷或趋热的变化。

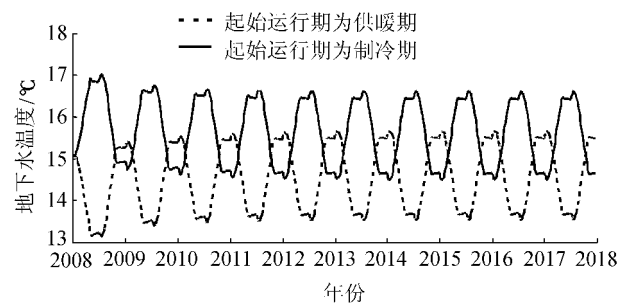


图3 不同起始运行期地下水温度变化曲线

模拟工况 2:热泵在保持现状冷热负荷及运行时间的条件运行,地下水温度初值为 15℃。模拟结果如图 4 所示,可以看出,在热泵系统长期运行过程中,地温在高低循环往复变化中呈降低趋势,并渐趋平稳。可见,当建筑物所需热负荷大于冷负荷时,每年都要消耗场地的部分浅层地热能以满足建筑物采暖要求,从而导致热泵场地的温度降低。在消耗部分浅层地热能的同时,周围的热量不断向抽灌场地传递,地温场影响范围不断增加,久而久之,外围传递进来的热量与消耗的浅层地热能渐趋平衡,地温变化渐趋平稳。

模拟工况 3:假设热泵系统冷负荷为 1 790 kW,

热负荷为 740 kW,地下水温度初值为 15℃。模拟结果如图 4,可以看出,当热负荷小于冷负荷时,每年都要向地下储存部分地热能,致使地温呈上升趋势,并渐趋平稳。

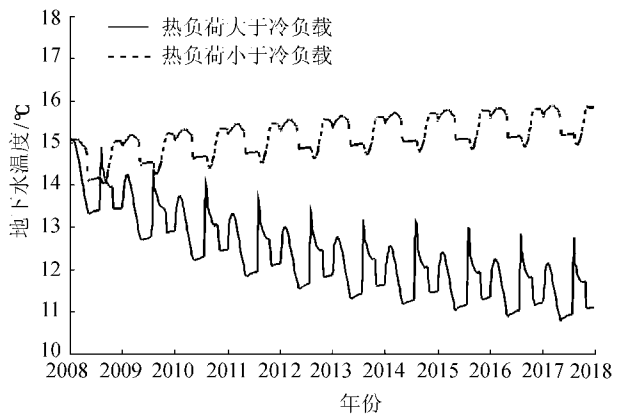


图 4 冷热负荷失衡条件下地下水温度变化曲线

由上述地下温度数值模拟结果,当建筑物所需冷热负荷平衡时,因场地温度变化较为稳定,没有出现趋高或趋低的现象,夏季、冬季均可以作为热泵系统运行的起始期。而当热负荷大于冷负荷时,消耗部分场地浅层地热能,年际运行过程中场地温度呈降低趋势,热泵系统运行起始期应选在夏季;当热负荷小于冷负荷时,储存部分热量于地下,年际运行过程中场地温度呈升高趋势,热泵系统运行起始期应选在冬季。

3 对地下水水质的影响

在热泵运行期间,抽灌区地下水流场及地下水温度均会发生变化。为了解热泵系统运行过程中地下水水质的变化,对北京市亦庄经济技术开发区水源热泵空调系统进行了为期 5 个月的观测,观测时间为 2003 年 11 月 19 日~2004 年 2 月 26 日,期间热泵系统处于冬季运行状态,笔者选取距离抽灌区最近观测井为研究对象,观测期间该井温度从 14.5℃(2003 年 11 月 12 日)降至 9.5℃(2002 年 2 月 19 日),各指标变化情况如表 2 所示。

表 2 监测指标质量浓度

采样时间	总硬度	$\rho(\text{TDS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cl}^{-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Fe})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mn})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_3^{-}\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_2^{-}\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4^{+}\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{F}^{-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
2003-11-19	247	533	59	107	0.13	0.003	2.11	1.86	0.26	0.98
2003-11-25	199	435	56	112	0.06	0.002	1.87	2.14	0.26	1.14
2003-12-03	307	661	70	84	0.06	0.002	2.61	1.57	0.16	0.62
2003-12-10	360	633	67	119	0.14	0.003	2.84	1.04	0.13	0.78
2003-12-18	373	551	72	102	0.12	0.002	3.36	0.36	0.09	0.62
2003-12-24	333	516	62	111	0.05	0.001	3.41	0.33	0.12	0.70
2004-01-07	324	549	80	104	0.11	0.002	3.29	0.28	0.08	0.73
2004-01-15	252	442	87	114	0.12	0.004	3.47	0.27	0.18	0.84
2004-02-19	319	509	70	101	<0.03	<0.001	3.93	0.12	<0.05	0.67
2004-02-26	340	515	80	97	<0.03	0.001	4.10	0.08	<0.05	0.62

从表 2 可以看出,总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 等较稳定的化学组分浓度呈供暖初期波动较大、中后期渐趋稳定的变化趋势。铁、锰、氟离子等组分浓度较低,随时间的变化幅度也较小。另外,其他观测井的资料显示,距抽灌井越远,其各组分浓度变化幅度越小。

值得注意的是,在供暖期观测井中“三氮”质量浓度变化具有较强的规律性, $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 质量浓度不断升高,而 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 的质量浓度则不断降低,如图 5 所示。这是由于该观测井距回灌井最近,回灌过程中空气随回灌水进入含水层, $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 在硝化菌的参与下被氧气硝化为 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$,导致“三氮”质量浓度的上述变化规律。

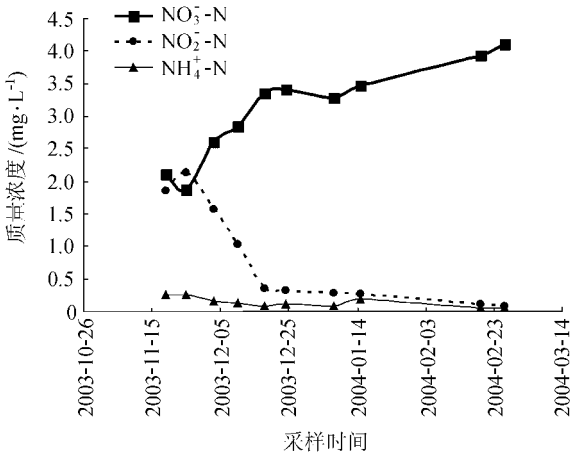


图 5 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 质量浓度历时变化曲线

总之,供暖期的各观测孔的水质变化表明,在热泵系统运行过程中,地下水水质质量浓度没有发生大的改变,较为稳定。

4 对微生物生长的影响

在地下水环境中,温度是影响细菌生长的重要指标。根据北京市经济技术开发区水源热泵运行期间的观测,地下水的温度变化对大肠杆菌数和细菌总数的影响较为明显。从所有观测孔的地下水温度与大肠杆菌和细菌总数的散点图(图 6、图 7)及其包络线可以看出,大肠杆菌数和细菌总数的高值区域

相对集中于温度为 13.2℃ 两侧的小范围内,随着温度向两侧趋高和趋低,大肠杆菌数和细菌总数均呈降低的态势,大致符合正态分布。

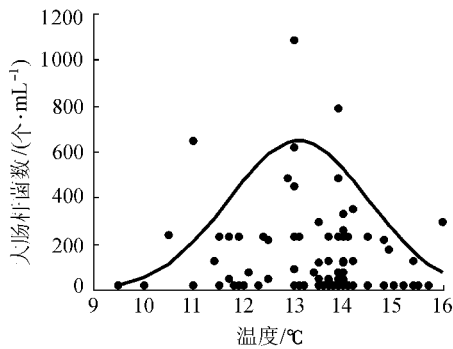


图 6 地下水温度与大肠杆菌数散点图

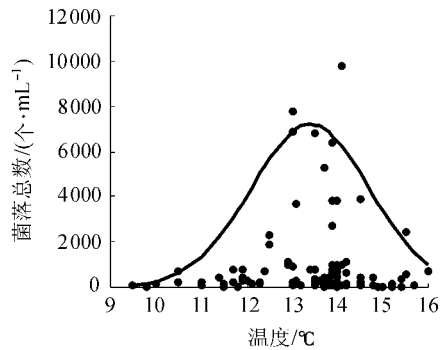


图 7 地下水温度与细菌总数散点图

地下水中的细菌容量包络线随地下水温度的变化呈正态分布的变化趋势,可拟合出两者间的正态分布曲线。大肠杆菌容量与温度的关系式为:

$$K_{\text{大肠杆菌}} = 650\exp\left[-\frac{(T - 13.1)^2}{2 \times 1.4^2}\right]$$

细菌容量与温度的关系式为:

$$K_{\text{菌落总数}} = 7200\exp\left[-\frac{(T - 13.4)^2}{2 \times 1.3^2}\right]$$

伴随着水源热泵系统制冷供暖的交替运行,地下水温度也不断发生变化,尤其在回灌井附近区域,地下水温度的高低交替变化非常显著,地下水温度始终处于动态变化之中。温度太高或太低,都会抑制细菌群体的生长速率。

5 结 论

热泵系统场地观测资料及地下温度场的数值模拟表明,系统运行对地下水流场、温度场、水质及微生物生长均会产生一定的影响。

a. 水源热泵场地地下水的抽灌将引起地下水流场的变化,抽灌平衡时地下水流场的影响范围主要与含水层导水系数、抽灌量及与抽灌井距离有关。

b. 冷热负荷平衡可使热泵系统保持较高运行效率,利于系统长期运行。冷热失衡条件下,含水层良好的储能特性受到抑制,抽灌区地下水趋冷或趋

热,影响热泵运行效率。

c. 当建筑物所需年内冷热负荷不平衡时,如热负荷大于冷负荷,热泵系统运行起始期应选在夏季;如当热负荷小于冷负荷,热泵系统运行起始期则应选在冬季。

d. 在热泵系统运行过程中,地下水水质浓度变化不大。不受含水层氧化还原环境影响的较稳定的化学组分水质浓度变化平稳;而‘三氮’受空气进入含水层影响,呈现规律性变化。

e. 细菌容量与地下温度之间的正态分布关系表明,场地温度或高或低均不利于细菌的生长。

参考文献:

[1] 倪龙,封家平,马最良. 地下水源热泵的研究现状与进展[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(2): 26-31.

[2] MANSURE A J, REITER M. A vertical groundwater movement correction for heat flow [J]. Journal of Geophysical Research, 1979,84(B7): 3490-3496.

[3] WOODBURY A D, SMITH L. On the thermal effects of three-dimensional groundwater flow [J]. Journal of Geophysical Research, 1985,90(B1): 759-767.

[4] DEMING D. Regional permeability estimates from investigations of coupled heat and groundwater flow, north slope of Alaska [J]. Journal of Geophysical Research, 1993,98(B9): 16271-16286.

[5] MONGELLI F, PAGLIARULO P. Influence of water recharge on heat transfer in a semi-infinite aquifer [J]. Geothermics, 1997, 26(3): 365-378.

[6] ROSENBERG N D, FISHER A T, STEIN J S. Large-scale lateral heat and fluid transport in the seafloor: revisiting the well-mixed aquifer model [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000,182: 93-101.

[7] 郝治福,康绍忠. 地下水系统数值模拟的研究现状和发展趋势[J]. 水利水电科技进展, 2006,26(1): 77-81.

[8] KIPP K L. Guide to the revised heat and solute transport simulator: HST3D-Version 2 [M]. Dener, Colorado: US Geological Survey, 1997: 1-49.

[9] 张远东,魏加华,李宇,等. 地下水源热泵采能的水-热耦合数值模拟[J]. 天津大学学报, 2006(8): 909-911.

(收稿日期 2009-02-11 编辑 徐 娟)

