

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.03.02

引用格式: 赵季初,纪洪磊,刘欢.鲁北平原地下咸水浅层地热能开发利用条件研究[J].中国地质调查,2020,7(3):13-20.

# 鲁北平原地下咸水浅层地热能开发利用条件研究

赵季初<sup>1,2</sup>, 纪洪磊<sup>1,2</sup>, 刘欢<sup>1,2</sup>

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队,德州 253072;

2. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心,德州 253072)

**摘要:**为了解决鲁北平原区农村冬季清洁供暖问题,扩大地下水地源热泵系统的应用规模,以区内广泛发育的咸水体为研究目标,在简述第四纪地层特征的基础上,阐明了第四纪含水砂层与咸水体的分布特征,总结了区内以往开展的4个浅层地热能勘查项目所施工的水文地质勘探孔抽水试验与回灌试验成果。结果表明:研究区咸水含水层单井涌水量 $320 \sim 475 \text{ m}^3/\text{d}$ ,单位涌水量 $12.76 \sim 28.3 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ,自然回灌条件下单井回灌量 $30 \sim 56 \text{ m}^3/\text{d}$ ,单位回灌量 $5.85 \sim 17.5 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ ;单眼开采井可供暖面积为 $3\,481.02 \text{ m}^2$ ,可满足约35户农村住宅的冬季供暖需求;研究区在进行浅层地热能开发时建议优先选择地下水地源热泵系统,对于供暖/制冷能耗需求较小的农村单户建筑,可选择地埋管地源热泵系统进行分散式供暖/制冷。

**关键词:**浅层地热能;建筑供暖;地下水地源热泵;地埋管地源热泵

**中图分类号:** P314.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8706(2020)03-0013-08

## 0 引言

自瑞士科学家1912年提出浅层地热能系统以来<sup>[1]</sup>,浅层地热能开发利用逐步引起了各国学者与企业界的关注<sup>[2-4]</sup>。目前,浅层地热能已成为一种建筑供暖与制冷的重要替代能源。J. W. Lund等<sup>[5]</sup>统计到的利用地源热泵技术开发利用浅层地热能的国家约82个,全球每年直接利用的地热能为 $163\,287 \text{ GW}\cdot\text{h/a}$ ,其中地源热泵占55.3%。我国自20世纪80年代开始利用浅层地热能进行建筑供暖与制冷<sup>[6]</sup>。随着化石能源对环境污染问题的突显,绿色清洁替代能源的开发得到了高度重视,我国出台了首部国家专项规划《地热能开发利用“十三五”规划》<sup>[7]</sup>,截至2015年底,全国浅层地热能供暖(制冷)面积达到 $3.92 \text{ 亿 m}^2$ 。

浅层地热能开发利用是通过热泵机组实现的,与传统空调相比,利用浅层地热能的热泵机组具有较高的能效比,节能效果明显<sup>[8-9]</sup>。根据地热能交换系统形式的不同,浅层地热能开发方式可

分为地埋管地源热泵系统与地下水地源热泵系统<sup>[10]</sup>,其中地下水地源热泵系统主要通过对流吸(散)热,热交换效率高于地埋管地源热泵系统<sup>[11]</sup>。鲁北平原区浅部地层岩性为松散碎屑物,具备优良的浅层地热能开发利用条件,区内已有的浅层地热能利用工程多采用地埋管地源热泵系统,埋管深度 $80 \sim 120 \text{ m}$ ,孔间距 $5 \sim 6 \text{ m}$ ,而对换热效率更高的地下水地源热泵系统认可度不高。鲁北平原区在埋深 $200 \text{ m}$ 以浅广泛分布有咸水体,由于地下水含盐量高,不被作为工农业及生活用水,是浅层地热能开发的良好热(冷)源。本文在概述鲁北平原区水文地质条件的基础上,对地下水源型浅层地热能开发利用条件进行了分析,并对比了地埋管地源热泵系统与地下水地源热泵系统的优劣,为区内地下咸水浅层地热能开发利用提供了依据。

## 1 研究区地质概况

### 1.1 地层

研究区埋深 $200 \text{ m}$ 以浅的地层自下而上为新

收稿日期: 2019-07-17; 修订日期: 2019-11-02。

基金项目: 山东省地质勘查项目“德州市浅层地温能调查评价(编号:鲁国土科字(2015)003号)”“滨州北海经济开发区浅层地热能调查评价(编号:鲁国土资字[2014]126号)”“平原县浅层地温能调查评价(编号:鲁国土资函[2017]151号)”联合资助。

第一作者简方数据(1975—),男,研究员,主要从事地热地质研究工作。Email: 597943119@qq.com。

近系明化镇组与第四系。新近系明化镇组在研究区均有分布,厚 300 ~ 900 m,岩性以土黄、棕红、棕黄色等杂色砂质黏土、砂质泥岩、泥岩和灰白色、浅灰色粉砂岩、细砂岩为主,局部夹灰绿色泥岩及钙质结核,压性结构面发育<sup>[12]</sup>。第四系沉积厚度 40 ~

220 m,自下而上可划分为下更新统、中更新统、上更新统及全新统。根据第四纪沉积物的分布规律,研究区可划分为鲁西隆起边缘沉积区、临清—济阳拗陷沉积区与埕宁隆起沉积区 3 个分区(图 1)<sup>[13]</sup>,各沉积分区第四系特征如表 1 所示<sup>[14]</sup>。

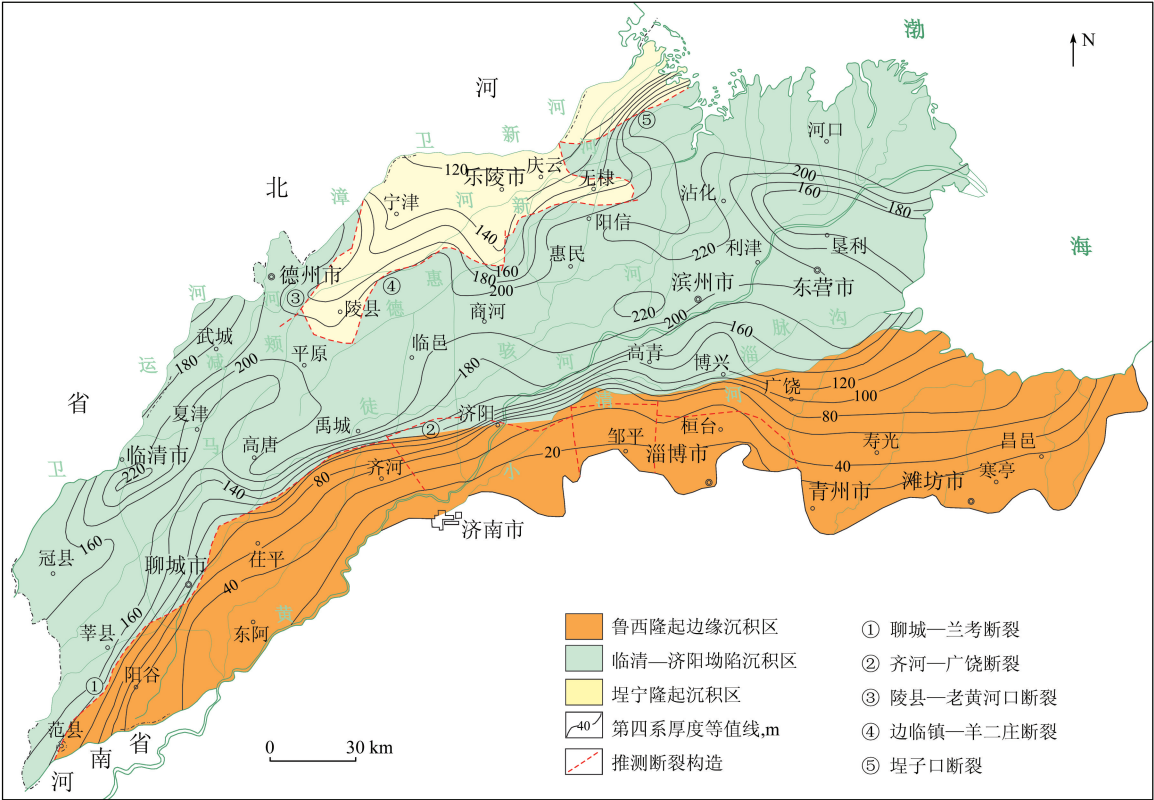


图 1 研究区第四系沉积分区及厚度等值线<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Quaternary sediment zonation and thickness contour of the study area<sup>[13]</sup>

表 1 研究区第四系地层特征

Tab. 1 Characteristics of Quaternary strata in the study area

| 地层                    | 鲁西隆起边缘沉积区                                                                 | 临清—济阳拗陷沉积区                                                               | 埕宁隆起沉积区                                                    |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 全新统(Q <sub>4</sub> )  | 厚约 20 m,除山前冲洪积扇部分地带有缺失外,发育齐全,根据岩性特征可分为 3 段,中段为灰至灰黑色湖沼相沉积,上、下段为灰黄至黄褐色河流相沉积 | 厚约 20 m。上、下均为黄河冲积陆相沉积,岩性与上更新统相同,但密度差;中部为海相层。近海区则以海相层和滨岸相地层为主             | 厚约 20 m。中部为灰黑色淤泥层;上、下部为灰褐色粉土或粉质黏土,夹粉砂层。近海地段有 1 期淤泥质海相沉积层   |
| 上更新统(Q <sub>3</sub> ) | 厚约 50 m,为山前冲洪积层与黄河冲积层过渡带,局部有湖沼相沉积,近海为海相沉积,岩性为灰黄色粉质黏土、粉细砂                  | 厚约 60 m,为黄河冲积物,东部地段夹 2 期海相沉积层,岩性为灰黄色粉土与粉砂互层,夹部分褐黄色粉质黏土,中上部及底部含湖沼相灰黑色淤泥质层 | 厚约 40 m,东部见有 2 期海相沉积,岩性为土黄至褐黄色粉土、粉质黏土互层,夹少量砂层,中上部和底部为淤泥质地层 |
| 中更新统(Q <sub>2</sub> ) | 厚 40 ~ 50 m,岩性为浅棕黄色粉质黏土与灰黄至深黄色粉土、粉砂互层,以河流相为主夹少量湖相沉积                       | 厚 90 ~ 100 m,岩性为棕黄色黏性土与褐黄色粉土互层,夹粉细砂层,含多层钙质淀积层,具河湖相沉积特征,东部有 2 期海相沉积       | 厚约 20 m,岩性为棕黄至灰黄色粉质黏土、粉土互层,夹少量砂层,含多层钙质淀积层                  |
| 下更新统(Q <sub>1</sub> ) | 缺失                                                                        | 厚 30 ~ 70 m,岩性为棕色粉质黏土与黄褐色至灰黄色粉土、粉细砂互层,发育有多层钙质淀积层                         | 缺失,东部发育薄层火山玄武岩,岩性为霞石质熔岩、火山集块岩等                             |

1.2 咸水体特征

1.2.1 咸水体分布

研究区地下水的水化学特征具有水平分带与垂向分带的特性,其中广泛分布的咸水体具有地下水水化学垂向分带的基本特征。根据咸水体的

空间分布,研究区地下水可分为山前倾斜平原全淡水区、黄泛平原咸淡水重叠区和滨海平原全咸水区<sup>[15]</sup>。中层咸水体分布广泛,厚度由滨海平原区(>400 m)向山前倾斜平原区逐渐尖灭<sup>[16]</sup>。具体分布特征如图2所示。

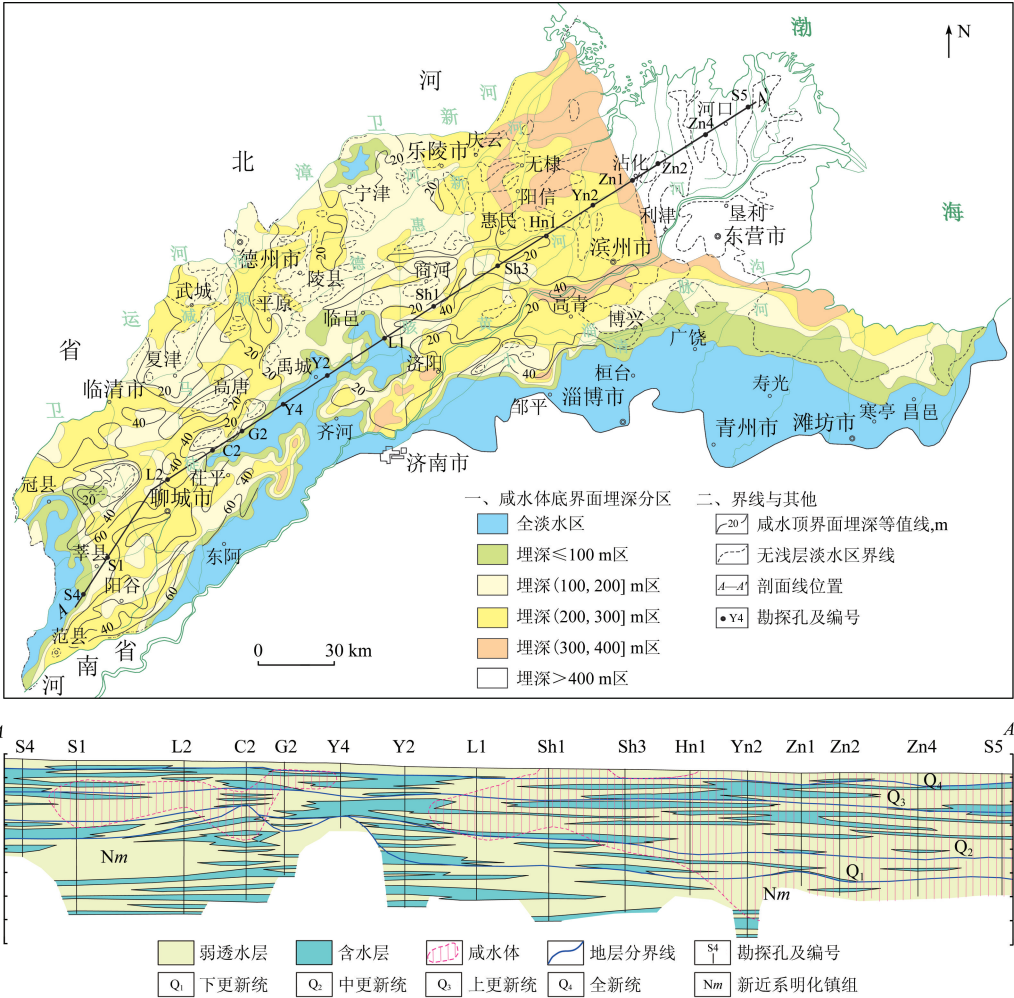


图2 咸水体顶和底板埋深及地质剖面<sup>[17-19]</sup>

Fig.2 Depth of the top and bottom of the salt water body and its geological profile<sup>[17-19]</sup>

1.2.1.1 顶板埋深

研究区咸水体顶板埋深受地形地貌、古河道分布的控制,自古河道带至古河道间带、自山前倾斜平原至黄泛平原,咸水体顶板埋藏由深逐渐变浅,其中在古河道带地区咸水体顶界面埋深一般为20~40 m,古河道间带顶界面埋深<20 m。在东北部滨海地区除在黄河故道局部地区分布有底界面埋深<10 m的上层滞水淡水体外(即咸水体顶界面埋深<10 m),无浅层淡水分布。在黄泛平原的河间地带呈岛状分布有无浅层淡水区,其外围地区咸水体顶界面埋深<10 m。在西南部的冠县—莘县及东南沿黄的全淡水区外围,咸水体顶板埋深

>60 m<sup>[17]</sup>。

1.2.1.2 底板埋深

区内深层地下水的补给区为西北方向的太行山脉及东南方向的鲁中南山脉,在靠近补给区的山前倾斜平原及宁津北部、冠县—莘县西南部无咸水体分布。在夏津—德州、临邑—宁津、阳谷—茌平一带咸水体的底界面埋深100~200 m,冠县北—临清、聊城—平原—武城、济阳—滨州—惠民—乐陵一带咸水体的底界面埋深200~300 m,东北部的黄河三角洲地区咸水体的底界面埋深>400 m<sup>[18]</sup>。



1.2.2 砂层分布

以地下水作为浅层地热能开发的冷热源,其开发利用条件的好坏主要受单井涌水量与回灌量控制,相同水位降深或回灌压力条件下,单井涌水量与回灌量的大小与含水层的渗透性能、含水层厚度成正比。研究区咸水体砂层的岩性以粉细砂为主,据统计,20 m 降深条件下单位砂层厚度的单井涌水量约  $1\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ ,即在砂层厚度 20 m 的古河道带地区,20 m 降深条件下单井

涌水量约  $20\text{ m}^3/\text{h}$ 。区内第四系中砂层的分布特征<sup>[20]</sup>如下。

1.2.2.1 下更新统砂层厚度

研究区南部阳谷—茌平—齐河—高青一线以南、冠县附近及宁津—无棣一带砂层缺失,在阳谷西—莘县一带、夏津—禹城—临邑一带、济阳—惠民一带、滨县北部及东营市附近砂层厚度  $>10\text{ m}$ ,局部地区砂层厚度  $>20\text{ m}$ ,其余广大地区砂层厚度  $0\sim10\text{ m}$ (图 3)。

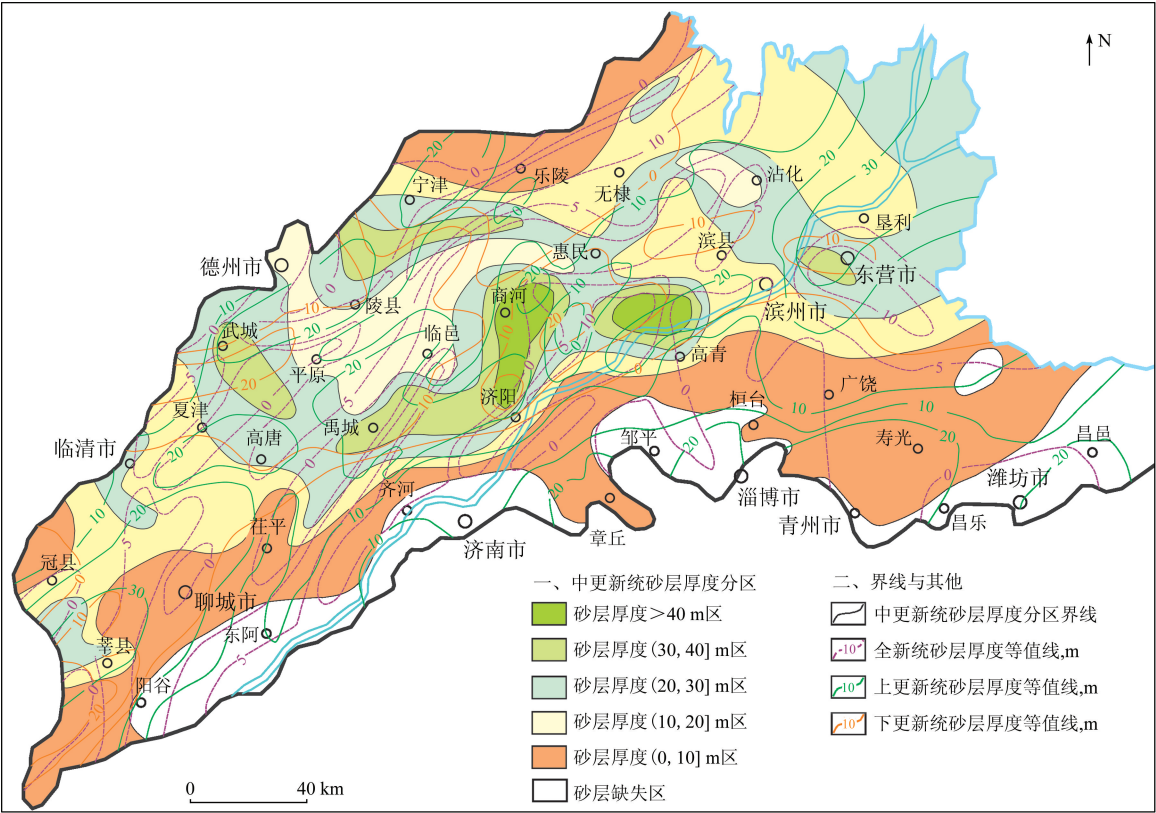


图 3 第四系砂层厚度等值线图<sup>[20]</sup>  
Fig.3 Contour map of cumulative thickness of sand layers of Quaternary<sup>[20]</sup>

1.2.2.2 中更新统砂层厚度

中更新统砂层厚度较大,武城—高唐—禹城—惠民—沾化—东营呈 NE 向分布有厚度  $>20\text{ m}$  的砂层,该古河道带中间的武城附近、禹城—商河一带、高青以北、东营市以西及宁津以南分布有厚度  $>30\text{ m}$  的砂层,古河道带外围地区砂层厚  $10\sim20\text{ m}$ ;聊城—济阳—广饶一线以南、冠县以西及乐陵—无棣一线以北砂层厚度  $0\sim10\text{ m}$ ;阳谷—东阿—齐河一线以南、邹平—桓台一线以南及昌乐—昌邑一线以东砂层缺失(图 3)。

1.2.2.3 上更新统砂层厚度

晚更新世,黄河开始由研究区西南的东阿附近

入境。在西南的莘县—聊城一带、临邑—禹城—济阳一带、武城—陵县—德州市东一带、宁津附近及垦利—东营市一带砂层厚度  $>20\text{ m}$ ,在古河道带局部地区砂层厚度  $>30\text{ m}$ ,章丘附近、淄博市以西、青州—寿光一带及昌邑附近发育有砂层厚度  $>20\text{ m}$  的冲洪积扇,古河道带外围及冲洪积扇外围砂层厚度  $10\sim20\text{ m}$ ,东阿—齐河—高唐一带、商河西—乐陵—无棣一带砂层厚度  $0\sim10\text{ m}$ (图 3)。

1.2.2.4 全新统砂层厚度

研究区全新统砂层厚度较薄,在古河道带砂层厚度  $5\sim10\text{ m}$ ,古河道间带砂层厚度一般小于  $5\text{ m}$ (图 3)。砂层埋深一般小于  $20\text{ m}$ ,不作为浅层地热



能开发的目标含水层。

2 开发利用条件

2.1 咸水含水层单井涌水量

目前研究区内尚未利用咸水体进行地下水地源热泵建设,个别工程开采埋深 300 ~ 500 m 的深层淡水为冬季供暖地下水地源热泵提供热源。本次研究总结了 4 个浅层地热能勘查项目所施工的水文地质勘探孔抽水试验与回灌试验成果(图 4),结果表明咸水含水层的出水能力较弱,单井涌水量 320 ~ 475 m<sup>3</sup>/d,单位涌水量 12.76 ~ 28.3 m<sup>3</sup>/(d·m)。由于研究区咸水体未被工农业开发利用,地下水的水位埋深浅,自然回灌条件下(井口未密封加压)单井回灌量 30 ~ 56 m<sup>3</sup>/d,单位回灌量 5.85 ~

17.5 m<sup>3</sup>/(d·m)。咸水层的井口出水温度 16.5 ~ 18.5 ℃(表 2)。

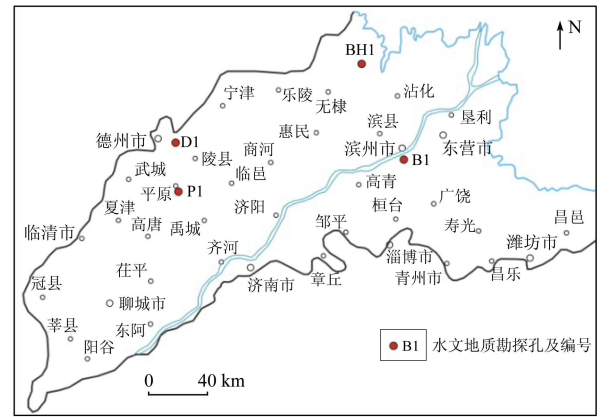


图 4 水文地质勘探孔位置

Fig.4 Location map of hydrogeological exploration boreholes

表 2 水文地质勘探孔单井涌水量与回灌量对比

Tab.2 Comparison of the yield and reinjection rate of single hydrogeological exploration well

| 孔号  | 孔深/m | 含水层厚/m | 水温/℃ | 水位埋深/m | 抽水试验 |                                        |                                                           | 回灌试验                                   |                                                           |
|-----|------|--------|------|--------|------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|     |      |        |      |        | 降深/m | 涌水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 单位涌水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ) | 回灌量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 单位回灌量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ) |
| B1  | 200  | 14.0   | 17.8 | 3.20   | 16.8 | 475                                    | 28.30                                                     | 56                                     | 17.50                                                     |
| D1  | 120  | 19.2   | 16.5 | 8.16   | 29.3 | 374                                    | 12.76                                                     | 49                                     | 6.00                                                      |
| BH1 | 200  | 9.0    | 18.5 | 2.40   | 14.5 | 320                                    | 22.07                                                     | 30                                     | 12.50                                                     |
| P1  | 125  | 9.7    | 16.5 | 8.20   | 26.4 | 350                                    | 13.26                                                     | 48                                     | 5.85                                                      |

2.2 开发利用投资成本

2.2.1 供暖热量估算

为分析利用咸水体开展地下水地源热泵供暖的可行性,以北方广大农村分散式供暖为目标,计算单井采用地下水地源热泵技术的可供暖面积。咸水含水层的单井涌水量按 350 m<sup>3</sup>/d、开采井出口温度按 17 ℃进行估算。根据目前地下水地源热泵机组的工作工况,供暖时水源侧的回水温度一般为 7 ℃,计算单井换热功率的公式<sup>[10]</sup>为

$$Q_h = q_w \cdot \Delta T \cdot \rho_w \cdot C_w \cdot 1.16 \times 10^{-5}。$$
 (1)

式中:  $Q_h$  为换热功率, kW;  $q_w$  为单井涌水量, m<sup>3</sup>/d;  $\Delta T$  为利用温差, ℃;  $\rho_w$  为地下水的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_w$  为地下水的比热容, kJ/(kg·℃)。

经计算,咸水体单井换热功率( $Q_h$ )约为 169.71 kW,以目前地源热泵的平均能效比 4.0<sup>[21]</sup>进行单井的可供暖面积估算,农村住房的隔热性能较差,单位面积供暖所需热量标准取建筑住宅与农业温室所需热量的平均值<sup>[22]</sup>,即 65 W/m<sup>2</sup>;经计算,单井可供暖面积为 3 481.02 m<sup>2</sup>,以户均住宅面

积 100 m<sup>2</sup>估算,单眼井可解决约 35 户农村住宅的冬季供暖需求。

2.2.2 投资成本

通过与地埋管地源热泵系统在热(冷)源侧的建设成本进行对比分析,估算采用咸水体作为地下水地源热泵系统热(冷)源的经济可行性。

2.2.2.1 地下水地源热泵系统

采用地下水作为热(冷)源的浅层地热能利用项目,为保证工程的可持续运行,防止地下水资源的浪费与尾水排放对环境造成不良影响,必须将热交换后的尾水回灌入开采含水层。根据勘探孔资料,自然回灌条件下单井回灌量按 48 m<sup>3</sup>/d 进行估算,为保证换热后的尾水能全部回灌入开采含水层,回灌井数量宜为 8 眼左右。根据抽水试验成果,开采井的影响半径在 200 m 左右,回灌井与开采井采用正八边形布局(图 5),开采井配套耐腐蚀的潜水泵。根据单井的换热功率,地源热源机组可选用输入功率为 50 ~ 60 kW(制热功率 200 ~ 240 kW)的机组,估算工程热源侧的投资约 41.3 万元(表 3),户均投资约 1.18 万元。

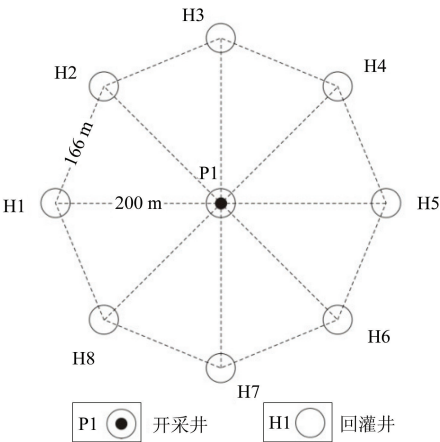


图 5 开采井与回灌井布局

Fig. 5 Layout of pumping and reinjection wells

表 3 地下水地源热泵系统热源侧建设成本估算(自然回灌)

Tab. 3 Investment estimation for groundwater heat pump( natural reinjection)

| 项目   | 数量 | 规格                   | 单价         | 总价/万元 |
|------|----|----------------------|------------|-------|
| 开采井  | 1  | 200 m                | 200 元/m    | 4.0   |
| 回灌井  | 8  | 200 m                | 200 元/m    | 32.0  |
| 潜水泵  | 1  | 30 m <sup>3</sup> /h | 3 000 元/台  | 0.3   |
| 热泵机组 | 1  | 50 ~ 60 kW           | 50 000 元/台 | 5.0   |
| 合计   |    |                      |            | 41.3  |

若考虑适当加压回灌方式,在不造成浅表地层破坏的前提下,可加压至 0.2 MPa(相当于 20 m 的水柱压力)。由表 2 可以看出,同一地区单井的单位回灌量约为单位涌水量的 1/2,因此可实现“1 采 2 灌”的布局,该条件下估算工程热源侧的投资约 17.6 万元(表 4),户均投资约 0.5 万元。

表 4 地下水地源热泵系统热源侧建设成本估算(加压回灌)

Tab. 4 Investment estimation for groundwater heat pump (pressurized reinjection)

| 项目   | 数量 | 规格                   | 单价         | 总价/万元 |
|------|----|----------------------|------------|-------|
| 开采井  | 1  | 200 m                | 200 元/m    | 4.0   |
| 回灌井  | 2  | 200 m                | 200 元/m    | 8.0   |
| 潜水泵  | 1  | 30 m <sup>3</sup> /h | 3 000 元/台  | 0.3   |
| 加压泵  | 1  | 30 m <sup>3</sup> /h | 3 000 元/台  | 0.3   |
| 热泵机组 | 1  | 50 ~ 60 kW           | 50 000 元/台 | 5.0   |
| 合计   |    |                      |            | 17.6  |

2.2.2.2 地埋管地源热泵系统

鲁北平原区农村住宅一般为四合院形式,单户占地面较大。基于农村住宅较分散的特点,采用地埋管地源热泵进行供暖/制冷时宜单户分散进行。根据区内实践经验,每户一般施工 80 ~ 100 m 深的

换热孔 1 ~ 2 眼,热泵机组选用输入功率为 1.5 ~ 2.0 kW(制热功率 6 ~ 8 kW)的机组,热源侧户均投资约 1.1 万元(表 5)。

表 5 地埋管地源热泵系统热源侧建设成本估算

Tab. 5 Investment estimation for ground – coupled heat pump

| 项目   | 数量 | 规格           | 单价        | 总价/万元 |
|------|----|--------------|-----------|-------|
| 换热孔  | 2  | 100 m        | 40 元/m    | 0.8   |
| 热泵机组 | 1  | 1.5 ~ 2.0 kW | 3 000 元/台 | 0.3   |
| 合计   |    |              |           | 1.1   |

综合以上分析,鲁北平原区利用咸水体进行地下水地源热泵系统建设,实行多户联合供暖/制冷,热源侧户均投资约 1.18 万元,与单户分散的地埋管地源热泵投资成本基本相当。若采用加压回灌方式进行地下水地源热泵系统建设,则其建设成本约为地埋管地源热泵投资成本的 1/2。

3 讨论

应用浅层地能为建筑物供暖与制冷提供冷热源,具有较好的节能效果<sup>[23]</sup>,在地源热泵系统建设时,需对其优缺点进行仔细对比分析,选择最有利的建设方案。

3.1 地下水地源热泵系统

3.1.1 优点

(1) 由于成井深度不大,一般采用钢筋混凝土材质作为套管与滤水管,当工程达到使用年限报废后回填,对地质环境的影响小。

(2) 直接抽取地下水作为冷热源,热泵系统的总能效比普遍高于地埋管地源热泵系统。

(3) 相对于地埋管地源热泵系统,在相同的冷热负荷条件下,地下水地源热泵系统需要的钻孔(井)数要少得多,对地下岩土体的扰动较小。

(4) 采用膨胀性黏土球进行止水,可以有效防止工程建设及运行过程地下水的串层污染。

3.1.2 缺点

(1) 回灌井止水措施若不好的话,可能会在回灌过程中因回灌水沿井身流动而对上部含水层(主要是淡水含水层)造成串层污染。

(2) 不合理的采灌井距造成开采井与回灌井直接连通,使开采井水温下降,热泵系统的能效比降低。

(3) 因物理、化学与生物堵塞作用造成回灌井

不能正常工作,换热后的尾水不能全部回灌入开采层中,产生地下水水位下降诱发地面沉降、尾水排放对周边地表水体污染、地下水资源浪费等问题<sup>[23]</sup>。

### 3.2 地埋管地源热泵系统

#### 3.2.1 优点

(1)采用埋设“U”型管的闭式循环换热技术,不抽取地下水,循环液(水)与地层之间只发生能量交换,不发生物质交换,对含水层(地层)的影响小。

(2)采用大量“U”型埋管并联换热,部分地埋管损坏不会对整个工程的正常运行产生较大的影响。

#### 3.2.2 缺点

(1)换热孔穿透不同水质的含水层,埋管时若采用不透水的回填材料则换热效果差,若采用透水的回填材料则会产生地下水的串层污染。

(2)地埋管一般采用聚乙烯塑料“PE”材质,其使用寿命一般为50 a左右,当工程达到使用寿命后,大量的地埋管就遗留在地下,其分解破坏会对地下水环境造成污染。

(3)聚乙烯塑料“PE”材料的抗折强度有限,在安装或运行过程中有可能发生渗漏。

(4)相对于地下水地源热泵系统,地埋管地源热泵系统需要大量地钻孔,对岩土体强度具有较大的影响,尤其对于岩体,在地埋管冷热交替工况条件下,会加速地埋管周边岩体的风化。

基于以上讨论,浅层地热能开发时宜优先选择地下水地源热泵系统。对于供暖/制冷能耗需求较小的农村单户建筑,可选择地埋管地源热泵系统进行分散式供暖/制冷。

## 4 结论

(1)鲁西北平原区在埋深200 m以内广泛发育有咸水体,因矿化度较高而不能作为工农业生产的水源,其井口出水温度16.5~18.5℃,是较好的地下水地源热泵系统的冷热源。单井涌水量320~475 m<sup>3</sup>/d,单位涌水量12.76~28.3 m<sup>3</sup>/(d·m),自然回灌条件下单井回灌量30~56 m<sup>3</sup>/d,单位回灌量5.85~17.50 m<sup>3</sup>/(d·m)。

(2)单井可供暖面积3 481.02 m<sup>2</sup>,可解决约35户农村住宅的冬季供暖需求,在进行地下水地源热泵系统建设时,可以采用30~35户农村住宅为供

暖单元的多户联供形式,自然回灌条件下可采用“1抽8灌”的建设方案,加压回灌条件下可采用“1采2灌”的建设方案。

(3)浅层地热能开发时宜优先选择地下水地源热泵系统。对于供暖/制冷需求较小的农村单户建筑,可选择地埋管地源热泵系统进行分散式供暖/制冷。

### 参考文献:

- [1] Lund J, Sanner B, Rybach L, et al. Geothermal (ground - source) heat pumps: A world overview [J]. Geo - Heat Center Quart Bull, 2004, 25(3): 1 - 10.
- [2] 廖汉光. 地源热泵在欧美国家的发展概况 [J]. 工程建设与设计, 2007(3): 6 - 10.
- [3] 赵军, 戴传山. 地源热泵技术与建筑节能应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [4] 栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 浅层地温能资源开发利用发展综述 [J]. 地质与勘探, 2013, 49(2): 379 - 383.
- [5] Lund J W, Boyd T L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review [J]. Geothermics, 2016, 60: 66 - 93.
- [6] 蒯文静, 吴庆华, 王贵玲. 我国浅层地温能潜力评价及其环境效应分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 57 - 61.
- [7] 国家发展改革委, 国家能源局, 国土资源部. 地热能开发利用“十三五”规划 [EB/OL]. (2017 - 01 - 23) [2019 - 06 - 10]. <http://www.nea.gov.cn/2017-02/06/c-136035635.htm>.
- [8] Rybach L. Ground - source heat pump systems the European experience [J]. GHC Bull, 2000, 3: 34 - 37.
- [9] 刘瀚, 陈安国, 周吉光, 等. 浅层地温能开发利用的环境效应 [J]. 中国国土资源经济, 2013(8): 36 - 39.
- [10] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0225—2009 浅层地热能勘查评价规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] 于媛. 北京市浅层地温能开发利用地质环境影响评价参数研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 22.
- [12] 徐军祥, 康凤新, 赵季初, 等. 山东省地热资源 [M]. 北京: 地质出版社, 2014: 73.
- [13] 陈孝燕, 王国栋. 山东省第四纪地质图 [M]//山东省地质矿产局. 山东省环境地质图集. 济南: 山东省地图出版社, 1996: 10.
- [14] 山东省地质矿产局. 山东省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 226.
- [15] 李壮, 马震, 孙瑞华. 鲁北平原含水系统划分及地下水循环条件研究 [C]//地质与可持续发展——华东六省一市地学科技论坛文集. 济南: 山东省科学技术协会, 2003: 95 - 98.
- [16] 邢立亭, 张凤娟, 李常锁, 等. 鲁北平原浅层地下水水化学特征 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 90 - 94.
- [17] 马兆丰, 王成全. 鲁西北平原浅层淡水底界面埋藏深度图 [M]//山东省地质矿产局. 山东省环境地质图集. 济南: 山东省地图出版社, 1996: 37.
- [18] 黄义海, 张汉臣. 鲁西北平原深层淡水顶界面埋藏深度图 [M]//山东省地质矿产局. 山东省环境地质图集. 济南: 山



东省地图出版社,1996:39.

[19] 林世忠,刘彦博,邱希青,等. 山东省水文地质剖面图[M]//山东省地质矿产局. 山东省环境地质图集. 济南:山东省地图出版社,1996:14.

[20] 王国栋. 鲁北平原第四纪古地理的演变[J]. 海洋地质与第四纪地质,1989,9(2):61-68.

[21] 周姣. 基于蒸汽压缩式热泵机组冷凝热回收的热水循环系统的技术性和经济性研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.

[22] 全国国土资源标准的技术委员会. 地热资源地质勘查规范 GB/T 11615—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2011:19.

[23] 徐光辉. 北京地区浅层地温能资源评价示范研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2007.

[24] 刘瀚,陈安国,周吉光,等. 浅层地温能开发利用的环境效应[J]. 中国国土资源经济,2013(8):36-39.

Study on the development and utilization prospect of shallow geothermal energy of saline underground water in Northern Shandong Plain

ZHAO Jichu<sup>1,2</sup>, JI Honglei<sup>1,2</sup>, LIU Huan<sup>1,2</sup>

(1. No. 2 Hydrogeology and Engineering Team of Shandong Geology and Mineral Exploration Bureau, Dezhou 253072, China; 2. Shandong Engineering Technology Research Center for Geothermal Clean Energy Exploitation and Reinjection, Dezhou 253072, China)

**Abstract:** In order to provide a way to expand clean heating energy and promote the utilization scale of groundwater heat pump system, the authors focused on the widespread saline water body in the study area, based on the stratigraphic characteristics of Quaternary strata. The distribution patterns of sand and saline water body of Quaternary were analyzed, and the pumping tests and reinjection hydrogeology tests from four previous shallowing geothermal energy exploration projects were summarized. The results show that the yield of a single well is 320 – 475 m<sup>3</sup>/d in saline water layers, with the unit yield of 12.76 – 28.3 m<sup>3</sup>/(d·m). And the natural reinjection rate is 30 – 56 m<sup>3</sup>/d, with the unit reinjection of 5.85 – 17.5 m<sup>3</sup>/(d·m). The total allowable heating floor area is 3 481.02 m<sup>2</sup> for one well, which could satisfy the heat load of 35 rural houses in winter. The groundwater heat pump system is preferable in the shallow geothermal development in the study area, while the scatter distributed ground – coupled heat pump system is optional for single rural building with less energy need for space heating/cooling.

**Keywords:** shallow geothermal energy; building heating; groundwater heat pump; ground – coupled heat pump (责任编辑: 刘永权)