

井陘县奥陶系灰岩浅层地温能开发利用潜力研究

张永泽, 于建丛*, 郜宁, 宋晓光, 梅学嘉

(河北省地质矿产勘查开发局国土资源勘查中心(河北省矿山和地质灾害应急救援中心), 河北石家庄 050081)

摘要:为研究井陘县奥陶系灰岩所蕴藏的浅层地温能,在井陘县的河谷内实施热响应试验钻孔一眼,测试了其岩石体物理力学、热物性参数及地温场特征,发现该地区10 m以深平均地温达到了16.77℃,夏、冬季工况测试条件下单位延米换热量分别为68.38、65.78 W/m。通过选取地下水位埋深、地下水流速等8项指标对井陘县进行了地埋管地源热泵适宜性评价,将评价区划分为较适宜区、适宜区和不适宜区,其中较适宜区面积为244.12 km²,占总面积的16.82%。在此基础上对较适宜区进行了资源潜力评价,计算了其资源潜力及节能减排能力。为了更好的验证井陘县奥陶系灰岩所蕴藏的浅层地温能具有开发利用价值,安装了相关配套应用工程及监测设备,监测了在不同工况测试条件下的耗能量,通过与普通家用空调耗能量进行对比分析,使用地埋管地源热泵年运行成本约为使用空调成本的55%,具备开发利用价值。

关键词:浅层地温能;适宜性评价;地埋管地源热泵;奥陶系灰岩;井陘县

中图分类号:P634:P314 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)03-0136-06

Research on potential of development and utilization for shallow geothermal energy in Ordovician limestone of Jingxing County

ZHANG Yongze, YU Jiancong*, GAO Ning, SONG Xiaoguang, MEI Xuejia

(Land and Resources Exploration Center of Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development (Hebei Mine and Geological Disaster Emergency Rescue Center), Shijiazhuang Hebei 050081, China)

Abstract: In order to study the shallow geothermal energy contained in the Ordovician limestone of Jingxing County, a thermal response test well in the valley is drilled, where the physical mechanics, thermal properties and geothermal field characteristics of the rock and soil mass are tested. As a result, the average geothermal temperature below 10m reached 16.77℃, and the heat transfer per unit length in summer and winter under the test conditions were 68.38W/m and 65.78W/m, respectively. Eight indicators such as the burial depth of the groundwater level and the velocity of the groundwater were selected to evaluate the suitability of ground source heat pump with buried pipe in Jingxing County, and the evaluation area was divided into more suitable area, suitable area and unsuitable area. Among them, the more suitable area is 244.12km², accounting for 16.82% of the total area. On this basis, the resource potential evaluation was carried out on the more suitable area, and the resource potential and energy saving and emission reduction capacity were calculated. In order to better verify the development and utilization value of the shallow geothermal energy contained in the Ordovician limestone of Jingxing County, the relevant supporting application engineering and monitoring equipment were installed to monitor the energy consumption under different test conditions. Compared with the energy consumption of the ordinary household air conditioners, the annual operating cost of ground-source heat pump with buried pipe is about 55% of the air conditioning, which possess the development and utilization value.

Key words: shallow geothermal energy; suitability evaluation; ground-source heat pump with buried pipe; Ordovician limestone; Jingxing County

收稿日期:2024-01-12; 修回日期:2024-03-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.03.018

基金项目:河北省地质矿产勘查开发局重点项目“革命老区乡村振兴重点县(井陘)生态环境地质调查”(编号:13000022P00329410085N)

第一作者:张永泽,男,汉族,1989年生,工程师,土木工程专业,硕士,主要从事水工环、浅层地热能方面的研究工作,河北省石家庄市桥西区中山西路800号,282202965@qq.com。

通信作者:于建丛,女,汉族,1987年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,主要从事水文地质、工程地质钻探施工与工艺研究工作,河北省石家庄市桥西区中山西路800号,1015620094@qq.com。

引用格式:张永泽,于建丛,郜宁,等.井陘县奥陶系灰岩浅层地温能开发利用潜力研究[J].钻探工程,2024,51(3):136-141.

ZHANG Yongze, YU Jiancong, GAO Ning, et al. Research on potential of development and utilization for shallow geothermal energy in Ordovician limestone of Jingxing County[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3):136-141.

0 引言

浅层地温能通常是指通过地源热泵换热技术利用的蕴藏在地表以下200 m以内岩土体、地下水和地表水中,温度低于25℃的热能。因其广泛分布、储量丰富、埋藏较浅、易于开发且具有清洁环保等特点,尤其是在2016年我国全面推进“北方地区冬季清洁取暖”后,浅层地温能的开发得到了各级政府的重视,因此,积极开展浅层地温能的研究具有重要意义。

目前,国内学者对浅层地温能多有研究。王刚等^[1]研究了浅层地热能开发回灌井施工技术,孙剑^[2]研究了石家庄市地下水源地热泵适宜区及含水层温度场变化特征,牛水源等^[3]讨论指标法与层次分析法在浅层地温能适宜性评价中的应用,于澜^[4]对邢台市地下水地源热泵进行了适宜性分区评价,卢玮等^[5]对浅层地热能地下换热系统适宜性评价与优化设计进行了相关研究,王婉丽等^[6]研究了华北平原主要城市浅层岩土的综合导热能力。这些研究使得人们对浅层地温能的开发利用有了一定的了解,但是这些研究多是针对第四系进行的,而基岩地区是否赋存浅层地温能资源目前研究较少。

本次工作系统地研究了河北井陘县奥陶系灰岩当中所蕴藏的浅层地温能,并且为了进一步验证其具备开发利用价值,本次研究工作配套了相关应用示范工程及监测设备,为研究基岩区浅层地温能提供了必要的理论及实际应用支撑。

1 浅层地温能赋存条件

1.1 地层概况

钻孔位于山前冲洪积扇与冶河交汇形成的河谷内,地表出露岩性为第四系松散岩类土层,埋藏较浅,以粉质粘土、粉土为主,偶见砂卵石,第四系内未见地下水,下覆奥陶系马家沟组(O₂m)灰岩。

1.2 水文地质条件

冶河河谷内地下水类型为第四系松散岩类孔隙水和奥陶系碳酸盐岩类裂隙岩溶水,含水层岩性为砂卵石和中厚层、厚层灰岩,花斑状、角砾状白云岩。河谷内地下水流动受盆地隔水底板起伏的控制,自两测山区向中心汇集,水力坡度较大,地下水水位埋深在20 m左右,含水层厚度约为80 m,单位涌水量>10 m³/h·m。由现场施工情况及所取的岩土体样品(见图1)分析,在45~108 m深度取得的

岩土样品为角砾状灰岩,岩土样品存在明显的薄层状波状交错层理,样品溶孔较发育,特征为顺层发育较大溶孔,多与垂直方向呈低角度,这表明存在明显的地下水流动情况,有利于提高换热效率。



图1 61~65 m岩心

Fig.1 Core from 61~65 m depth

1.3 地温场特征

本次试验监测了0~120 m深度范围内的地温,其中0~10 m地温受环境因素影响较大,地温较低,地温变化幅度较大,为变温层,增长速率为1.2℃/m,平均地温约为9.37℃;10 m以后,地温逐渐趋于稳定,为恒温层,平均地温为16.77℃,地温梯度值为2.0℃/100 m。地温梯度变化曲线如图2所示。

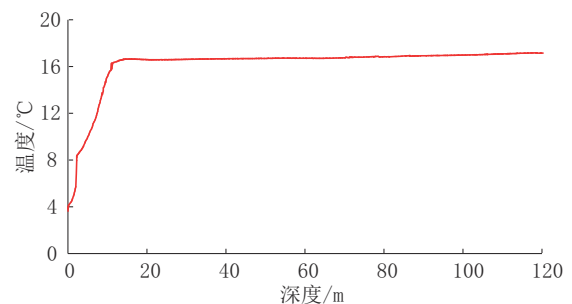


图2 地温梯度变化曲线

Fig.2 Change of ground temperature gradient

1.4 热响应实验及岩土体测试结果

本次现场热响应试验在120 m双U形埋管换热孔中进行,双U形管采用DN32聚乙烯管(PE100),下管前后分别进行打压试验和观测,测试合格后带压下管,下管完成后使用中细砂多次回填。回填完毕静置5 d后再进行设备连接,并排完循环管路内空气以及做好保温措施,测试仪采用河北省地球物理勘查院研制的DR-10型岩土热响应测试仪,采用恒温法开展现场热响应试验。

夏季工况测试功率为8.0 kW时,稳定供水温度

为23.7℃,稳定回水温度为19.4℃,测试条件下单位延米换热量为68.38 W/m。冬季工况设定的设备出水温度为6℃,稳定回水温度为9.9℃,测试条件下

单位延米换热量为65.78 W/m。测试结果见表1。本次共采集8件岩土样品,测试其物理力学及热物性参数数据详见表2。

表1 热响应试验成果

Table 1 Thermal response test results

钻孔编号	孔深/m	初始地温/(℃)	测试工况	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	热阻/ [(m·K)·W ⁻¹]	延米换热量 /(W·m ⁻¹)	单孔换热量 /(kW·孔 ⁻¹)
ZK01	120	16.77	排热工况(8.0 kW)	7.57	0.07	68.38	8.20
		(10 m以深)	取热工况(6℃)	4.00	0.04	65.78	7.89

表2 岩土样品物理力学及热物性参数

Table 2 Physical mechanics and thermal property parameters of rock and soil samples

编号	取样深度/m	样品名称	干密度/ (g·cm ⁻³)	饱和密度/ (g·cm ⁻³)	相对 密度	孔隙 率/%	孔隙 比	热导率/ [W·(mK) ⁻¹]	比热 /[kJ·(kg·K) ⁻¹]	热扩散率/ (mm ² ·s ⁻¹)
RW01	1.8~2.0	粉质粘土 (夹砂)	1.93	2.23	2.72	28.2	0.41	1.56	1294	0.56
RW02	8.3~8.2	粉质粘土 (含砂砾石)	2.02	2.27	2.70	24.5	0.34	1.67	1213	0.63
RW03	11.4~11.6	角砾状灰岩	2.52	2.60	2.73	7.82	0.08	2.69	834	1.29
RW04	24.8~25.0	泥质灰岩	2.53	2.58	2.66	4.63	0.05	2.76	804	1.27
RW05	47.4~47.6	角砾状灰岩	2.42	2.53	2.73	11.08	0.12	2.54	866	1.20
RW06	69.7~69.9	角砾状灰岩	2.61	2.65	2.70	3.14	0.03	3.07	878	1.34
RW07	86.1~86.3	角砾状灰岩	2.66	2.68	2.70	1.39	0.01	2.87	854	1.25
RW08	108.1~108.4	角砾状灰岩	2.62	2.65	2.69	2.82	0.03	3.56	867	1.60

注:测试环境平均室温为18~22℃,相对湿度为45%~55%。

2 换热方式适宜性分区

2.1 埋管地源热泵适宜性评价体系

层次分析法,简称AHP方法,是一种解决多目标负责问题的定性与定量相结合的分析方法^[7-10]。采用层次分析法进行埋管地源热泵适宜性评价。

参考相关文献资料^[11-12],结合工作区内具体情况,选取地下水位埋深、地下水流速、含水层厚度、地层岩性、第四系厚度、导热系数、比热容和地温等8项指标作为本次地源热泵适宜性评价的指标。

埋管地源热泵适宜性评价的层次分析法由3个层阶构成^[13-14],目标层为埋管地源热泵适宜性分区;属性层为水文地质条件、地层属性与热物性;第三层为要素层,即由地下水埋深、地下水流速、含水层厚度、地层岩性、第四系厚度、导热系数、比热容及地温等构成。如图3所示。

2.2 埋管地源热泵评价因子权重的计算与分析

根据构建的评价体系,应用专家打分法对其进

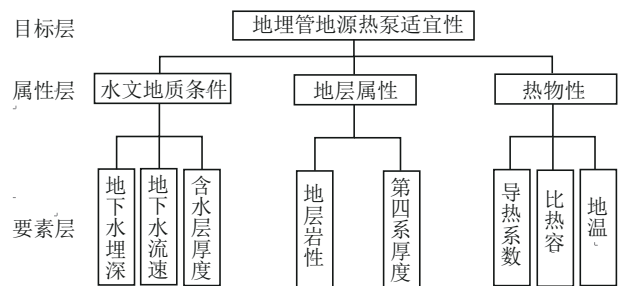


图3 埋管地源热泵适宜性分区评价模型

Fig.3 Suitability zoning evaluation model of ground-source heat pump with buried pipe

行赋值,从而计算得出各要素因子的权重。通过计算,得出各要素因子的权重如表3所示。

从表3看出,对基岩地区来说,岩体的比热容对于埋管地源热泵的实际应用起到关键作用,其权重最大,占到34.20%;含水层厚度、地下水流速对热的传导、交换等均有较大影响,因此,其权重较大,

表3 地埋管地源热泵评价指标要素权重
Table 3 Ground-source heat pump evaluation index weight list

一级属性	权重占比/%	二级属性	权重占比/%
水文地质条件	45	地下水埋深	4.95
		地下水流速	18.45
		含水层厚度	21.60
地层属性	10	地层岩性	7.50
		第四系厚度	2.50
		导热系数	5.40
热物性	45	比热容	34.20
		地温	5.40

占比分别为21.60%和18.45%。以上三者也是基岩地区对地源热泵换热效果影响最大的3个因素。其次,地层岩性、地下水埋深、导热系数和地温等因素也对基岩地区地源热泵的换热效率有一定的影响。而第四系厚度是基岩地区影响较小的因素,其权重占比也是最小的,仅占比2.50%,但是也应该具体问题具体分析,由于本工程第四系底板埋深较浅,且第四系内没有含水层,因此本工程研究因子中第四系厚度影响最小。如果第四系厚度较大且有含水层,应该重新考虑第四系厚度对地源热泵换热效率的影响。

2.3 地埋管地源热泵适宜性分区

根据层次分析法进行指标因子权重的计算,选择地下水埋深、地下水流速、含水层厚度、地层岩性、第四系厚度、导热系数、比热容和地温作为评价因子,并根据专家意见对每个因子赋值,按综合指数的数学模型 $A_i = \sum(C_i \times W_i)$, 将每个因子的赋值与权重相乘,然后求和,即可得出综合分值。

根据专家意见并考虑区域特点,设定地埋管地源热泵适宜区的评价标准:综合分值0~3为不适宜区,综合分值3~6的区域为较适宜区,综合分值6~9的区域为适宜区^[15]。

根据以上分区标准,本次在井陘县所实施的热响应试验最终得分为5.90分,为较适宜区,根据该孔地质情况类推至井陘县内具有相似地质背景条件的地区,初步划定井陘盆地及绵河和冶河河谷为较适宜区,面积为244.12 km²,占总面积的16.82%;其他地区地质条件较差,划定为不适宜区,面积为1206.86 km²,占总面积的83.18%。如图4所示。



图4 地埋管地源热泵浅层地热能适宜性分区

Fig.4 Suitability zoning map of the shallow geothermal energy using ground-source heat pump with buried pipe

3 资源潜力评价

参照《浅层地热能勘查评价规范》^[16],采用体积法计算评价区200 m以浅包气带和饱水带中的单位温差赋存热量,在考虑土地利用系数的情况下,评价区200 m以浅浅层地热能资源潜力如表4所示。

表4 地埋管资源潜力计算

Table 4 Potential calculation of buried pipe resources

分区	面积/ km ²	冬季换 热功率/ 10 ⁴ kW	夏季换 热功率/ 10 ⁴ kW	冬季资源 潜力/(10 ⁴ m ² ·km ⁻²)	夏季资源 潜力/(10 ⁴ m ² ·km ⁻²)
较适宜区	244.12	13354.34	12891.85	20.11	13.19

按照1 kg标准煤产生的能量2.93076×10⁷ J计算,根据表4得到利用地埋管换热系统可实现的节能减排能力详见表5。

4 工程实际试验

4.1 实际监测数据

为更好的验证井陘县奥陶系灰岩所蕴藏的浅层地热能具有开发利用价值,本次研究实验安装了2台家用室内空调及相关配套监测设备,每台空调

表5 地理管地源热泵单位面积节能减排能力

利用时间	单位面积资源量/($10^{10}\text{J}\cdot\text{km}^{-2}$)	节煤量/($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$)	减排量/($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$)				
			二氧化碳	二氧化硫	氮氧化物	悬浮质粉尘	煤灰渣
冬季	567171.03	19377.21	46234.03	3294.13	116.26	155.02	19.38
夏季	410646.42	14029.60	33474.63	2385.03	84.18	112.24	14.03
合计	977817.45	33406.81	79708.66	5679.16	200.44	267.25	33.41

供暖制冷面积均为 55 m^2 。

4.1.1 取暖工况

根据实际监测数据,取暖温度调为 $26\text{ }^\circ\text{C}$,在只开1台空调的工况条件下,地源热泵运行每小时用电量约为 $1.04\text{ kW}\cdot\text{h}$,按照每度电 0.52 元及整个取暖季 120 d 计算,总费用为 1557 元;在2台空调同时打开的工况条件下,地源热泵运行每小时用电量约为 $1.50\text{ kW}\cdot\text{h}$,取暖季总费用为 2246 元。

4.1.2 制冷工况

根据实际监测数据,制冷温度调为 $17\text{ }^\circ\text{C}$,在只开1台空调的工况条件下,地源热泵运行每小时用电量约为 $0.46\text{ kW}\cdot\text{h}$,按照每度电 0.52 元及整个制冷季 120 d 计算,总费用为 689 元;在2台同时打开的工况条件下,地源热泵运行每小时用电量约为 $0.70\text{ kW}\cdot\text{h}$,制冷季总费用为 1048 元。不同工况条件下运行能耗统计如表6所示。

表6 运行能耗统计

工况	设置温度/ $^\circ\text{C}$	运行时间/d	台数	总费用/元
制冷	17	120	1	689
			2	1048
制热	26	120	1	1557
			2	2246

4.2 运营成本分析

普通家用空调每小时用电量约为 $1.0\text{ kW}\cdot\text{h}$,按照每度电 0.52 元及整个取暖或制冷季 120 d 计算,1台家用空调运行总费用约为 1498 元。

通过对该监测点运行期间制热、制冷的数据分析,单台地源热泵在取暖工况条件下的费用与单台空调运行费用接近,但是两台同时打开的情况下,地源热泵的运行费用明显低于两台普通空调的运行费用,约为其 75% ;单台地源热泵在制冷工况条

件下,每小时用电量约为 $0.46\text{ kW}\cdot\text{h}$,较单台空调使用费用明显降低,运行费用约为使用单台空调费用的 50% ;如果两台同时启动,运行费用约为两台空调使用费用的 35% ,可见其在制冷工况下,地源热泵的经济效果更为显著。如果可以达到规模开发,运行费用可进一步降低。

综合考虑全年“制冷+制热”合并使用,年运行成本约为使用空调成本的 55% ,可见,井陘县奥陶系灰岩所蕴藏的浅层地温能具备开发利用价值。

5 结论与建议

(1)本次试验监测了 $0\sim 120\text{ m}$ 深度范围内的地温,其中 $0\sim 10\text{ m}$ 地温受环境因素影响较大,地温较低,地温变化幅度较大,为变温层,增长速率为 $1.2\text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$,平均地温约为 $9.37\text{ }^\circ\text{C}$; 10 m 以后,地温逐渐趋于稳定,为恒温层,平均地温为 $16.77\text{ }^\circ\text{C}$,地温梯度值为 $2.0\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 。

(2)本次工作对井陘县进行了地理管地源热泵适宜性评价,其中地理管地源热泵较适宜区面积为 244.12 km^2 ,占总面积的 16.82% 。

(3)对较适宜区进行了资源潜力评价,计算了其资源潜力及节能减排能力。利用地理管换热系统可实现节煤 $33406.81\text{ t}/(\text{a}\cdot\text{km}^2)$,减排二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、悬浮质粉尘和煤灰渣分别为 79708.66 、 5679.16 、 200.44 、 267.25 、 $33.41\text{ t}/(\text{a}\cdot\text{km}^2)$ 。

(4)通过对该监测点运行期间制热、制冷的数据分析,单台地源热泵在取暖工况条件下的费用与单台空调运行费用接近,但是两台同时打开的情况下,地源热泵的运行费用明显低于两台普通空调的运行费用,约为其 75% ;单台地源热泵在制冷工况条件下,较单台空调使用费用明显降低,约为其 50% ,如果两台同时启动,运行费用约为两台空调使用费用的 35% 。可见其在制冷工况下,地源热泵的经济效果更为显著。如果可以达到规模开发,运

行费用可进一步降低。如果综合考虑全年“制冷+制热”合并使用,年运行成本约为使用空调成本的55%,井陘县奥陶系灰岩所蕴藏的浅层地温能具备开发利用价值。

(5)本工程同时研究了水源热泵和地源热泵,但水源热泵未实施具体工程,水源热泵在靠近河道处的适宜性需要进一步研究。目前该工程仍为前期研究,建议从初期投资、运行成本、投资回报周期、环境效益等因素来综合分析评价经济上的适宜性。

参考文献(References):

- [1] 王刚,宋佳,王盼盼,等.浅层地热能开发回灌井施工技术研究——以郑州市东、西部新城区为例[J].钻探工程,2022,49(6):153-161.
WANG Gang, SONG Jia, WANG Panpan, et al. Drilling technology for recharge wells in shallow geothermal energy development: A case study of the new districts in the east and west of Zhengzhou[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 153-161.
- [2] 孙剑.石家庄市地下水源地热泵适宜区及含水层温度场特征变化研究[D].石家庄:河北地质大学,2020.
SUN Jian. Study of suitability evaluation and characteristic change of aquifer temperature field in groundwater source heat pump in Shijiazhuang[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2020.
- [3] 牛水源,刘金勇,黄伟荣.指标法与层次分析法在浅层地温能适宜性评价中的应用讨论[J].山东国土资源,2021,37(4):73-80.
NIU Shuiyuan, LIU Jinyong, HUANG Weirong. Discussion on application of index method and analytic hierarchy process in suitability evaluation of shallow geothermal energy [J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(4): 73-80.
- [4] 于澜.邢台市地下水源地热泵系统适宜性分区评价[J].勘察科学技术,2023,2:30-35.
YU Lan. Suitability zoning evaluation of groundwater source heat pump system in Xingtai urban area [J]. Editorial Office of Site Investigation Science and Technology, 2023, 2: 30-35.
- [5] 卢玮,尚永升,申云飞.浅层地热能地下换热系统适宜性评价与优化设计——以郑州市浅层地热能示范工程为例[J].钻探工程,2022,49(3):146-153.
LU Wei, SHANG Yongsheng, SHEN Yunfei. Suitability evaluation and optimization design of the shallow geothermal energy underground heat exchange system: Taking Zhengzhou shallow geothermal energy demonstration project as an example [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 146-153.
- [6] 王婉丽,王贵玲,刘春雷,等.华北平原主要城市浅层岩土综合导热能力研究——基于现场热响应试验分析[J].地质学报,2020,94(7):2089-2095.
WANG Wanli, WANG Guiling, LIU Chunlei, et al. A study of effective thermal conductivity in the North China Plain based on in situ thermal response tests [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2089-2095.
- [7] 崔庆岗.层次分析法在肥城市浅层地温能埋管地源热泵适宜性分区评价中的应用[J].化工矿产地质,2021,43(4):339-346.
CUI Qinggang. Application of analytic hierarchy process in the evaluation of suitable zoning of ground source heat pump for shallow geothermal buried tube in Feicheng City [J]. Geology of Chemical Minerals, 2021, 43(4): 339-346.
- [8] 张承斌.基于层次分析法-模糊综合评价模型的浅层地温能适宜性评价——以山东省昌乐县为例[J].中国地质调查,2022,9(2):91-99.
ZHANG Chengbin. Suitability evaluation of shallow geothermal energy based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation: A case study of Changle County in Shandong Province [J]. Geological Survey of China, 2022, 9(2): 91-99.
- [9] 刘欢,王学鹏,刘文强,等.基于GIS的浅层地温能开发利用适宜性评价的应用分析[J].地下水,2022,44(5):88-90.
LIU Huan, WANG Xuepeng, LIU Wenqiang, et al. Application analysis of suitability evaluation of shallow geothermal energy development and utilization based on GIS [J]. Ground Water, 2022, 44(5): 88-90.
- [10] 于慧明,杨泽,都基众.基于层次分析法的沈阳市埋管地源热泵适宜性评价[J].地质与资源,2016,25(6):563-566.
YU Huiming, YANG Ze, DU Jizhong. AHP-based suitability zoning and assessment for the ground-source heat pump system in Shenyang City [J]. Geology and Resources, 2016, 25(6): 563-566.
- [11] 刘文涛,陈国辉,钱康,等.基于层次分析法的广安主城区埋管地源热泵适宜性评价[J].地下水,2022,44(4):21-23,33.
LIU Wentao, CHEN Guohui, QIAN Kang, et al. Suitability evaluation of ground source heat pump based on analytic hierarchy process in the main urban area of Guang'an [J]. Ground Water, 2022, 44(4): 21-23, 33.
- [12] 黄露玉,梁金龙,刘斌,等.基于组合赋权法的广安市地源热泵适宜性分区[J].科学技术与工程,2022,22(13):5116-5124.
HUANG Luyu, LIANG Jinlong, LIU Bin, et al. Suitability zoning of ground source heat pump in Guang'an City based on combination weighting method [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5116-5124.
- [13] 徐晓,骆祖江,常晓军.江苏丹阳市滨江新城浅层地温能开发利用适宜性分区研究[J].中国煤炭地质,2017,29(5):45-52.
XU Xiao, LUO Zujia, CHANG Xiaojun. Study on shallow geothermal energy exploitation and utilization suitability zoning in Binjiang New Residential Quarter, Danyang City, Jiangsu Province [J]. Coal Geology of China, 2017, 29(5): 45-52.
- [14] 陈玲,陈锁忠,何亮,等.基于GIS的镇江市浅层地温能开发利用方式适宜性分区研究[J].湘潭大学学报(自然科学版),2022,44(3):117-126.
CHEN Ling, CHEN Suozhong, HE Liang, et al. Research on suitability zoning of shallow geothermal energy development and utilization modes in Zhenjiang City based on GIS [J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2022, 44(3): 117-126.
- [15] 邓鼎兴.埋管地源热泵水热耦合与浅层地温能适宜性评价[D].武汉:中国地质大学,2015.
DENG Dingxing. Thermo-hydro coupling simulation of BHE and shallow geothermal energy geological suitability assessment [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [16] DZ/T 0225—2009,浅层地热能勘查评价规范[S].
DZ/T 0225—2009, Specification for shallow geothermal energy investigation and evaluation[S].

(编辑 王文)