

DOI: 10.12401/j.nwg.2023041

宁夏银川市浅层地温能赋存条件和开发利用潜力评价

赵银鑫, 公亮, 吉卫波, 田硕丰, 孙变变, 吴文忠, 王改平, 马风华

(宁夏回族自治区基础地质调查院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 扩大浅层地温能这种可再生绿色能源的开发利用规模, 对中国的节能减排和可持续发展具有重要的意义。本次通过银川市浅层地温能资源调查, 查明了宁夏银川市浅层地温能蕴藏条件。本研究利用 Arcgis 软件使用层次分析法对研究区进行埋管地源热泵适宜性分区, 并进行浅层地温能资源潜力评价。研究认为, 研究区范围无埋管地源热泵不适宜区, 适宜区面积分布最广为 1 767 km², 占比为 56.04%; 较适宜区面积为 1 386 km², 占比为 43.96%; 研究区埋管地源热泵开采潜力较大, 夏季开发潜力为 42.7 万 m²/km², 冬季开发潜力为 36.0 万 m²/km²。根据研究成果提出研究区浅层地温能资源开采和规划意见, 为后续制定开发利用方案提供思路与依据。

关键词: 浅层地温能; 埋管地源热泵; 适宜性分区; 潜力评价

中图分类号: P641; P314

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0172-13

Conditions for the Occurrence and Development and Utilization Potential Evaluation of Shallow Geothermal Energy in Yinchuan City, Ningxia

ZHAO Yinxin, GONG Liang, JI Weibo, TIAN Shuofeng, SUN Bianbian, WU Wenzhong,
WANG Gaiping, MA Fenghua

(Ningxia Hui Autonomous Region Institute of Geological Survey, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Expanding the scale of development and utilization of shallow geothermal energy is of great significance for energy conservation, emission reduction and sustainable development in China. The investigation and evaluation of shallow geothermal energy in Yinchuan started late. In order to avoid blind exploitation of shallow geothermal energy, the occurrence conditions of shallow geothermal energy and the evaluation of development and utilization potential are important technical support. By identifying the occurrence conditions of shallow geothermal energy in Yinchuan, the suitability zoning of ground source heat pump with buried pipe in the study area was carried out by using analytic hierarchy process (AHP) and Arcgis software. Finally, the potential of shallow geothermal energy resources was evaluated. The results show that there is no unsuitable area for ground source heat pump with buried pipe in the study area, the most suitable area which is most widely distributed is 1 767 km², accounting for 56.04%. The comparatively area is 1 386 km², accounting for 43.96%. The development potential of ground source heat pump with buried pipes in the study area is huge, the development potential in summer is 42.7 million m²/km², and the development potential in winter is 36.0 million m²/km². Based on the research results, the development and utilization giving suggestions of shallow geothermal energy in the study area were given to provide ideas and basis for the subsequent development and utilization plan.

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-10-20; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 宁夏回族自治区财政专项“银川都市圈城市地质调查”(宁地财发[2021]2号)资助。

作者简介: 赵银鑫(1984-), 男, 工程师, 主要从事水工环地质、城市地质、综合地质工作。E-mail: 275504770@qq.com。

Keywords: shallow geothermal energy; ground source heat pump; suitability partition; potential evaluation

浅层地温能是指地下一定深度范围内(目前开发利用的经济深度一般在200 m以内)地下水和土壤内部埋藏的地温热能,通过热泵技术收集利用后,可以用来供暖或者制冷(韩再生等,2007;杨如辉等,2011)。浅层地温能是一种特殊矿产资源,也是一种新型的可再生环保能源,利用前景广阔。相较其他能源而言,浅层地温能有着可循环再生、可就近利用、储量巨大、分布广泛等优点。因此,为解决资源短缺和环境污染的现状,中国于20世纪80年代开始研究地源热泵技术,并在90年代开展示范项目,同时国家政府出台一系列的激励政策和管理法规,来支持浅层地温能的开发利用(王贵玲等,2012;沈军等,2021;刘文辉等,2023;张茂省等,2023)。据统计,截至2010年全国应用浅层地温能资源的总面积约为 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^2$,多集中在华北和东北地区(栾英波等,2013)。尽管国内的浅层地温能开发利用起步较晚,但截止2012年中国供热制冷面积就已跃居世界第二(丁宏伟等,2016)。2015年中国已经调查评价了336个城市,并且通过研究评价发现这些地级以上城市具有浅层地温能的潜力。结果表明,年可采折合标煤可达 $7 \times 10^8 \text{ t}$,可实现供暖制冷面积为 $320 \times 10^8 \text{ m}^2$ (蔺文静等,2013;冉伟彦等,2014;王贵玲等,2017;王婉丽等,2017;沈军等,2021)。

中国浅层地温能资源开发利用起步较晚,但进入21世纪后开发利用浅层地温能技术发展迅速(闫福贵,2013),到2013年地源热泵技术就跃居世界第二位(栾英波,2013)。未来的工作可能延伸至中小城镇,将浅层地温利用面积进一步扩大(王贵玲等,2020)。贵州省“十四五”期间在浅层地热能蕴藏条件分析上进行潜力评价和适宜性分区,冬季供暖面积为 $1.22 \times 10^9 \text{ m}^2$,夏季埋管地源热泵的制冷面积为 $1.18 \times 10^9 \text{ m}^2$ (彭佳等,2021;张新,2021);山东省章丘区冬季浅层地温能潜力评价后能够供暖的面积为 $6\,504.666\,2 \times 10^4 \text{ m}^2$,夏季能够制冷的面积较少,为 $535.127\,8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。综合来看,发现研究区浅层地温能经济和社会效益明显、使用和开发的潜力水平很高(孙明远等,2021)。因此,开采和使用浅层地温能对确保国家能源安全、优化中国当前的能源结构、推进国家节能减排战略的完成具有十分重要的现实意义。

笔者以银川市第四系地层为主要研究对象,研究浅层地温能赋存条件,并且结合埋管地源热泵,对其进行适宜性分区,然后展开对银川市浅层地温能开发利用和开发潜力评价的工作,旨在为研究区浅层地温能开发利用提出建议,并为后续制定开发利用方案提供依据。

1 浅层地温能赋存条件

1.1 地质结构

银川市第四系沉积物主要为湖积、冲积和洪积,并且其余地区分布湖沼沉积物和风积物。其中,贺兰山东麓洪积物分布最为广泛,有一条黏性土的细粒带位于其前缘地带很容易发现。现在浅层地热能开发和效益较好的深度大多小于200 m,文中研究主要涉及第四系地层的地质结构、成因类型、时代等(图1、图2,表1)。

下更新统:沉积类型以冲湖积层沉为主,埋藏深度大于190~200 m,岩性为灰黑色、灰褐色细砂夹棕褐、灰褐、灰白色黏性土、灰褐色砂砾石及卵砾石。

中更新统:沉积以冲洪积和冲湖积等类型为主。冲湖积层埋深为80~120 m,岩性为灰黑色、灰色及褐灰色细砂夹灰色、棕灰、灰白黏性土,并有泥砾存在于部分细砂;冲洪积层埋深为130~150 m,厚度约为60 m,岩性以青灰色粉细砂和灰黄色、暗灰色细砂为主,夹带黏性土,洪积平原的西侧下部细砂内含有砾石。

上更新统:沉积类型主要有冲湖积、冲洪积、洪积等。冲湖积层厚度为60~120 m,埋藏深度为2~30 m,岩性为黏土质砂、砂质黏土、中细砂;冲洪积层厚为50~90 m,埋深为60~80 m,岩性为灰色细砂夹砂黏土,在山前洪积斜平原附近部分细砂中含砾石;在贺兰山东麓洪积斜平原分布有洪积层,岩性为砂质黏土、黏质砂土、砂、砂砾石、漂砾及块石,由洪积平原前缘变为细粒带,自东向西颗粒逐渐变粗。

全新统:银川市有较多的全新统沉积类型,包括冲洪积、冲湖积、风积、湖沼积、洪积、冲积等类型。冲洪积层岩性为黏性土、粉细砂夹砂砾石,厚度小于20 m;冲湖积平原的一级阶地是冲湖积层主要分布地

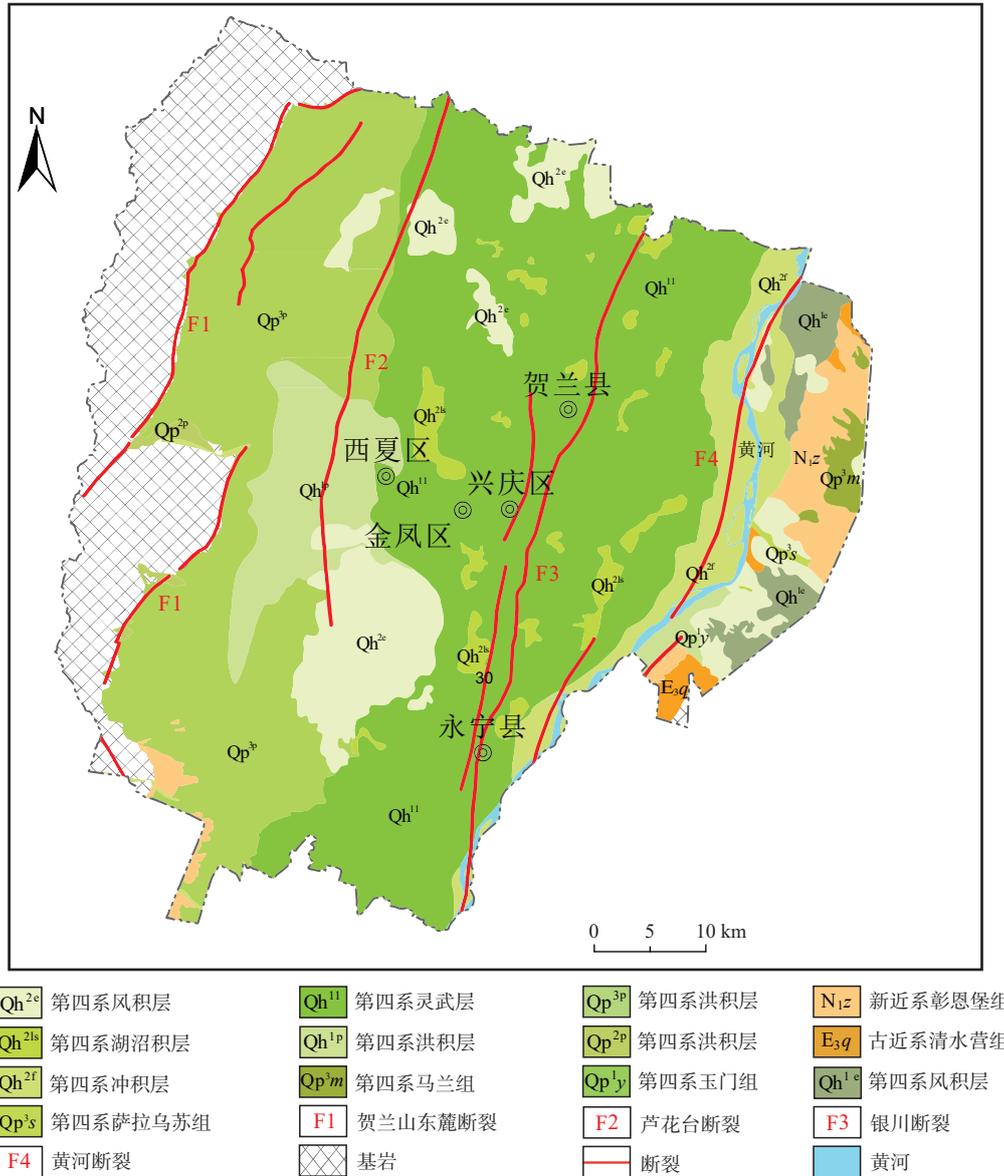


图1 银川市地质图

Fig. 1 Geological map of Yinchuan city

区,岩性为黏性土、细砂及粉细砂,厚度小于15 m;风积分布散乱,岩性为粉细砂和中细砂,最大厚度为20~30 m;河湖积平原的一、二级阶地是湖沼沉积层主要分布地区,岩性以黏性土、粉细砂为主,厚度小于3 m;在银川市新市区以西是洪积层的主要分布地带,岩性为含砾砂、碎石、砂砾石夹黏性土,厚度小于5 m;冲积层大都位于河漫滩和黄河河床中,岩性为粉细砂、砂砾石夹黏性土,厚度小于10 m。

1.2 水文地质条件

结合银川市水文地质条件、地貌及地质和钻孔数据等资料的分析,第四系松散岩类孔隙水包括多层结构区和单一潜水区2个区域。含水岩组分区图、典型

水文地质剖面见图3和图4。

1.2.1 单一潜水区

在银川平原范围的南部和西部部分地区为单一潜水区,其潜水区内的岩性,主要由青铜峡峡口冲积和贺兰山东麓山麓洪积砂卵砾石组成,地下水是单一潜水,水质良好,水量丰富。

(1) 在贺兰山东麓分布有贺兰山东麓洪积斜平原单一潜水区,岩性自西向东由粗变细,为贺兰山前缘冲洪积物。地下水水位埋藏深度南部比北部要高,西部比东部要高。洪积扇前方的水位埋藏深度大多为10~30 m,单井涌水量高于1 000 m³/d,水质较好,溶解性总固体大多不超过1 g/L,水化学类型主要是重碳酸

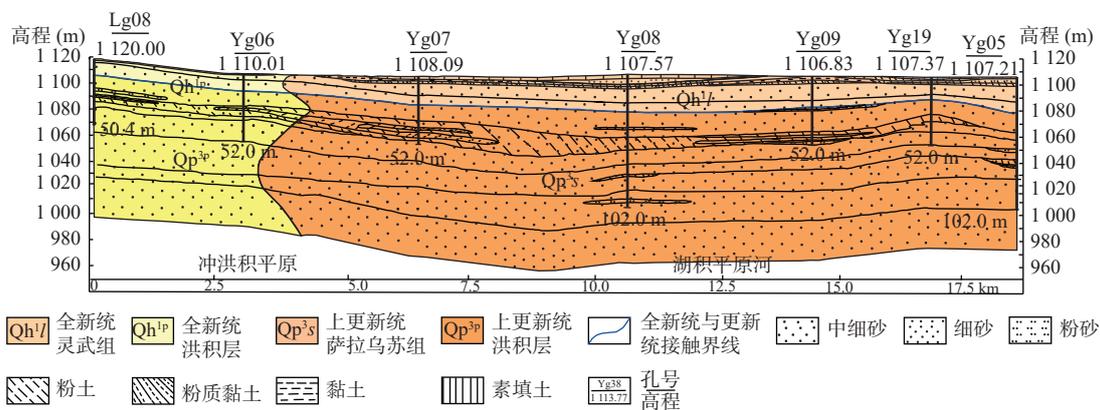


图 2 银川市典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological profile of Yinchuan city

表 1 第四系成因类型及时代描述表

Tab. 1 Genesis type and era description of Quaternary

第四系	沉积类型	厚度	埋藏深度	主要岩性及分布规律
下更新统	冲湖积层	-	大于 190~200 m	灰黑色、灰褐色细砂夹棕褐、灰褐、灰白色黏性土、灰褐色砂砾石及卵砾石
中更新统	冲湖积层	-	80~120 m	灰黑色、灰色及褐灰色细砂夹灰色、棕灰、灰白黏性土, 并有泥砾存在与部分细砂
	冲洪积层	约为 60 m	130~150 m	岩性以青灰色粉细砂和灰黄色、暗灰色细砂为主, 夹带黏性土, 洪积平原的西侧下部细砂内有砾石
上更新统	冲湖积层	60~100 m	2~30 m	黏土质砂、砂质黏土、中细砂
	冲洪积层	50~90 m	60~80 m	岩性为灰色细砂夹砂黏土, 在山前洪积斜平原附近有些部分细砂中含砾石
	洪积层	-	-	岩性为砂质黏土、黏质砂土、砂、砂砾石、漂砾及块石, 由洪积平原前缘变为细粒带, 自东向西颗粒逐渐变粗, 分布在贺兰山东麓洪积斜平原
全新统	冲洪积层	厚度小于 20 m	-	黏性土、粉细砂夹砂砾石
	冲湖积层	-	-	黏性土、细砂及粉细砂, 主要分布在冲湖积平原的一级阶地
	风积层	最大厚度为 20~30 m	-	粉细砂和中细砂
	湖沼沉积层	厚度小于 3 m	-	岩性以黏性土、粉细砂为主, 主要分布在河湖积平原的一、二级阶地
	洪积层	-	-	岩性为含砾砂、碎石、砂砾石夹黏性土, 银川市新市区以西是洪积层的主要分布地带
	冲积层	厚度小于 10 m	-	岩性为粉细砂、砂砾石夹黏性土, 大都位于河漫滩和黄河河床中

盐型水。

(2) 黄河以西单一潜水区沿黄河西侧条带状展布, 含水岩组埋深 8.4~37.0 m 以上, 第四系全新统的黄褐色细砂、粉砂层是其含水层的岩性, 成分以长石及石英为主, 局部夹青灰色砂砾层, 厚度为 0.5~1.0 m, 分选好, 磨圆度较好, 水位埋深为 1.5~2.25 m; 其底部为新近系泥岩。水化学类型为重碳酸型水。

(3) 黄河以东单一潜水区沿黄河东侧展布, 含水

岩组埋深 8.0~23.5 m 以上, 第四系全新统风积的黄褐色粉砂、细砂层为含水层岩性, 水位埋深约为 2.37~10.54 m。民井单井涌水量为 10~50 m³/d, 溶解性总固体为 0.592~3.28 g/L, 水化学类型为氯硫酸型水。

1.2.2 多层结构区

深度超过 250 m, 多层结构区划分为 3 个含水岩组, 从下向上依次是第二承压含水岩组、第一承压含



图3 银川市含水岩组分区图

Fig. 3 Area map of water-bearing rock composition in Yinchuan City

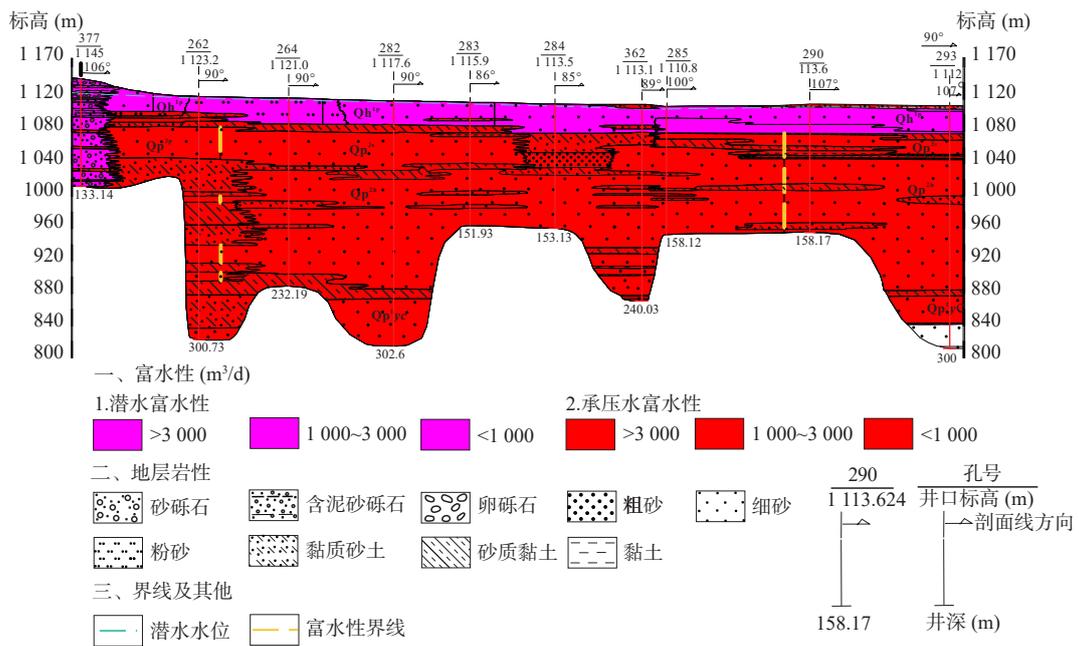


图4 银川市典型水文地质剖面图

Fig. 4 Hydrogeological profile of Yinchuan city

水岩组和潜水含水岩组, 各个相邻含水岩组间一般具有比较连续的弱透水体。

(1) 在平原区北部潜水含水岩组岩性主要是粉细砂, 中段主要是细砂, 南段主要是中细砂。厚度大多为 20~60 m, 其富水性大部分地带大于 1 000 m³/d。

(2) 第一承压含水岩组顶板埋深大多为 25~60 m, 底板埋深大多为 140~160 m。一般 2~5 个相互具有水力联系的含水层构成含水岩组, 地下水体之间相互贯通, 连续性差, 黏性土夹层不稳定, 岩性主要为粉细砂、细砂以及少部分中砂。银川市第一承压含水岩组具有较好的富水性, 单井涌水量大多为 1 000~5 000 m³/d。

(3) 在冲湖积、冲洪积平原与贺兰山东麓洪积倾斜平原前缘接触地带存在主要为黏性土的细粒带的沉积, 厚度超过 300 m, 东西宽为 2~5 km, 细粒带水量、厚度、岩性变化较大。潜水含水岩组岩性主要为细砂, 单井涌水量小于 1 000 m³/d。细砂、粉砂是承压含水岩组的主要岩性, 单井涌水量大多为 1 000~2 000 m³/d。

1.3 岩土体热物性特征

1.3.1 室内测试

根据典型孔取样和测试结果(图 5)可以看到, 砂土天然含水率平均为 19.72%, 黏土天然含水率为 23.11%; 砂土天然密度平均为 2.01 g/cm³, 黏土天然密度为 1.98 g/cm³; 砂土导热系数平均为 2.04 W/m·K, 黏土导热系数为 1.44 mm²/s; 砂土热扩散系数平均为 0.96 mm²/s, 黏土热扩散系数为 0.63 mm²/s; 砂土比热容平均为 1.07 kJ/kg·K, 黏土比热容为 1.17 kJ/kg·K。

1.3.2 地温特征

根据 15 个地温监测井测温数据分析, 浅层地温梯度约为 2~5 °C/100 m, 恒温层约为 30 m, 温度为 11~13 °C。西部地温梯度小于 2.5 °C/100 m, 中东部地温梯度为 2.5~4.5 °C/100 m, 小部分区域地温梯度大于 4.5 °C/100 m。

1.3.3 热响应测试

浅层地热能资源调查评价中的热响应试验和测试研究是工作的重中之重, 为浅层地热能资源开采规划及数值模拟提供基础。收集银川市 9 处热现场热响应试验数据, 选择闽宁镇施工 3 孔浅层地温能钻孔进行热响应试验, 分析银川市地层稳定工况测试、稳定热流测试和平均初始地温测试下的浅层地温能地埋管地源热泵开采和使用条件。

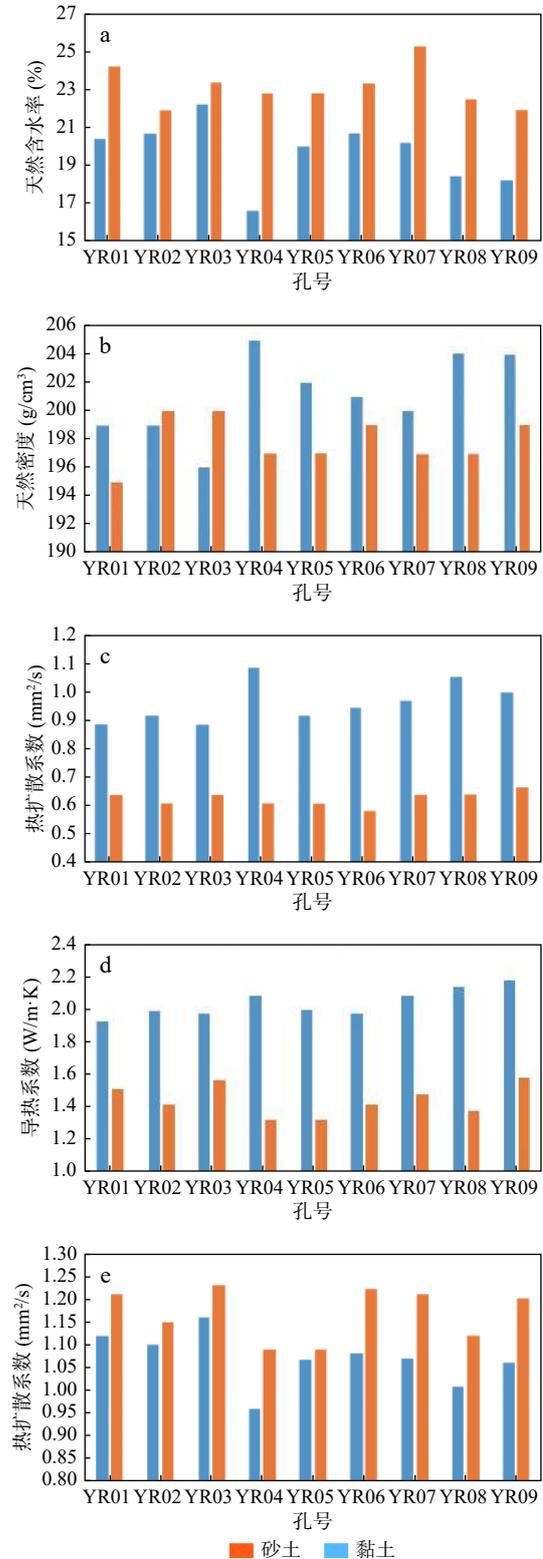


图 5 基本热物性测试结果对比图

Fig. 5 Basic thermophysical properties test results

实验仪器主要包括 2 个部分, 分别是测量系统和控制主机, 主要包含数据采集系统、埋地换热器、恒温流加热器、温度传感器、流量传感器以及循环水泵

等。已经实现了2种热响应试验,分别是稳定加热功率8.3 kW的大功率试验和稳定加热功率5.03 kW的小功率试验,然后模拟了埋管地源热泵系统在夏季和冬季的恒温测试。典型孔的测试数据如图6所示,计算结果见表2。

2 埋管地源热泵适宜性分区

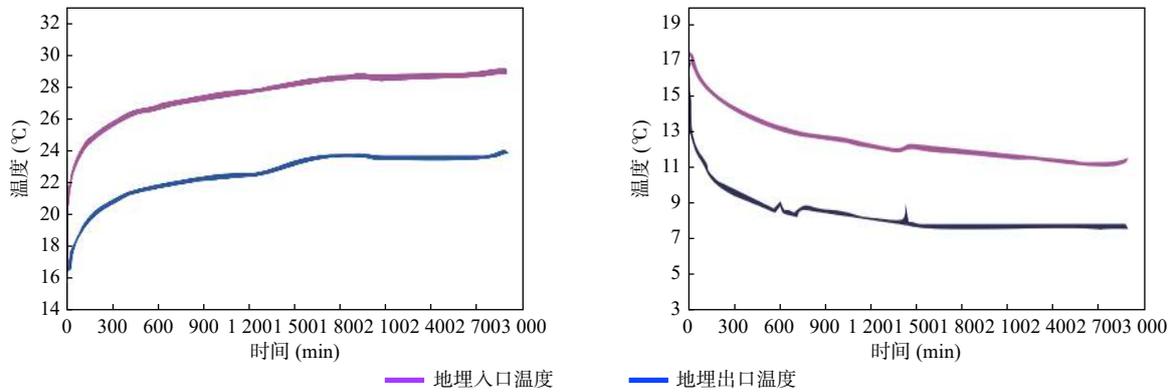
2.1 分区方法

层次分析法(The Analytic Hierarchy Process, AHP),由美国运筹学家 Saaty 在 20 世纪 70 年代中期提出,主要为层次化、系统化、定量和定性相结合的分析方法(刘建霞等, 2012; 金婧等, 2012; 兰善治, 2016)。笔

者通过计算与作图 2 个步骤确定埋管地源热泵适宜性分区,计算 2 个方面内容,其中涵盖了确定权重体系与确定评分体系。采用层次分析法(AHP)确定其评价指标中各要素的权重,通过专家小组的综合打分来确定评分,对研究区内各个要素使用 Arcgis 软件对其属性赋值,在矢量叠加之前先栅格化各个要素图层,把各要素评分和相应的权重相乘相加计算出综合评分,并根据综合评分再适宜性分区。

2.2 评价过程

根据董殿伟等(2010)、苑雷等(2013)、胡元平等(2015)对地温能的研究成果,选取 10 个指标作为评价因子对武汉都市发展区评价埋管地源热泵适



a. 大功率 8.300 kW, 流量 1.411 m³/h 测试; b. 冬季恒温测试, 供水温度 7.95 °C, 流量 1.374 m³/h

图 6 典型钻孔的热响应测试图

Fig. 6 Thermal response test of a typical borehole

表 2 浅层地温能热响应测试结果表

Tab. 2 Thermal response test results of shallow geothermal energy

编号	埋管深度(m)	埋管类型	初始温度(°C)	综合热导率 [W/(m·°C)]	夏季每延米排热量(W/m)	冬季每延米取热量(W/m)
MD-01	200	双U	16.46	2.43	56.20	43.80
MD-02	200	双U	15.58	2.26	38.70	25.00
MD-03	200	双U	14.63	2.68	56.90	32.00
YR01	90	单U	13.35	1.97	46.27	25.74
YR02	200	单U	14.31	2.32	54.40	-
YR03	90	双U	13.46	2.30	53.33	-
YR04	200	单U	13.39	2.18	-	21.81
YR05	125	双U	16.04	2.10	56.01	-
YR06	90	双U	12.96	2.32	76.95	-
YR07	90	双U	13.40	2.00	65.11	25.84
YR08	90	双U	13.07	1.84	74.84	-
YR09	125	双U	13.95	1.98	-	30.02

注: -表示为做相应工况测试。

宜性分区,并对各个评价因子选取依据进行说明。结合当地水文地质资料和开发浅层地温能的影响因素,把地埋管热泵适宜性分区的评价因子划分为承压水富水性、砂土黏土厚度比、地形地貌、岩土体

平均比热容、综合热传导系数、含水岩组厚度、潜水水位埋深、潜水富水性 10 类。地埋管适宜性分区层次结构见图 7,各评价因子分区及结果见图 8 和图 9。

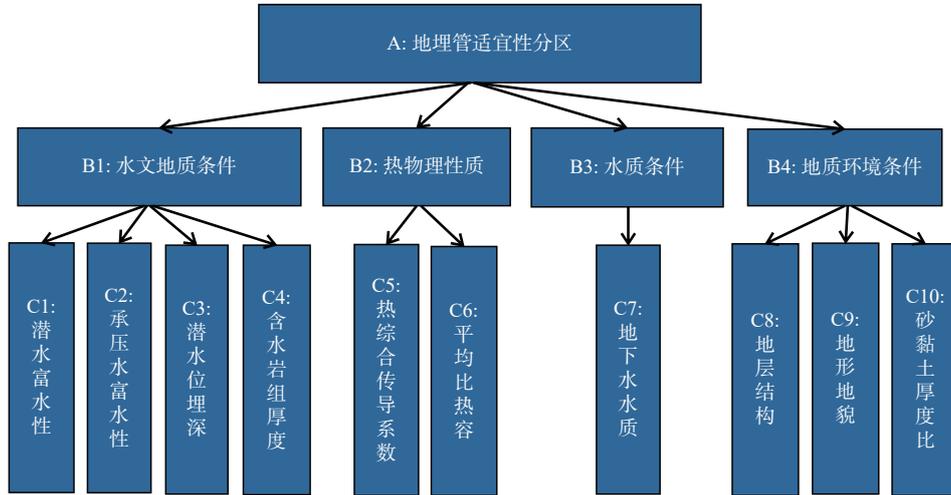


图 7 地埋管地源热泵适宜性分区层次结构图

Fig. 7 Hierarchical structure diagram of the suitability of underground ground-source heat pumps

根据判断矩阵建立指标之间的相对重要性,然后转化为权重,结果见表 3。

2.3 分区结果

由于各个研究区评价指标的评分标准不完全相同,所以综合评分的等级划分标准也不相同,最后将研究区分为较适宜区、适宜区。研究区内综合评分最大值为 8.4,最小值为 3.8,根据综合评分划分出的 2 个区间,确定地埋管热泵的形式开采和使用浅层地热能较适宜区域综合评分区间为 3.8~6.1,面积为 1 386 km²,占比为 43.96%;适合建造地埋管热泵开采和使用浅层地热能综合评分区间为 6.1~8.4 的区域,面积为 1 767 km²,占比为 56.04%;得出银川市地埋管热泵适宜性分区图(图 9)。

3 浅层地温能资源潜力评价

在适宜性分区基础上,计算银川市浅层地温能资源潜力,主要包括适宜区浅层地温能热容量计算和资源潜力评价 2 个方面(张甫仁等, 2013),可为节约能源和减少污染作出贡献(闫福贵, 2013)。

3.1 浅层地热能容量计算

3.1.1 计算方法

银川平原的第四系厚度一般都在 200 m 以上,研

究区内热容量包括饱水带和包气带的热容量。因为经济条件的约束,现在大部分浅层地热能利用和开发的钻孔深度大约为 200 m,所以将评价研究区地面以下 200 m 深度以浅的范围内第四系中存储的浅层地热能资源。文中采用了《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T0225-2009)中的热储法对浅层地温能热容量研究分析,并对地层中饱水带和包气带单位温差所储藏的热量进行分别计算,将地质体评级范围内的储热容量进行统一计算整理。

岩土含水率、土体孔隙度、岩土体比热容及岩土体密度来自于测试,利用 ArcGis 9.3 软件在垂向上加权平均后,再在平面上利用面积加权平均确定;空气的比热容取 1.003 kJ/(kg·°C),空气的密度取 1.29 kg/m³;水的比热容取 4.180 kJ/(kg·°C),水的密度取 1 000 kg/m³。

3.1.2 计算结果

将计算得到的研究区内 200 m 综合热容量值,经过插值处理后得到浅层地温能分布情况(图 10),其中包气带总热容量为 2.32×10¹³ kJ/°C,包气带内空气热容量值为 2.01×10⁹ kJ/°C,包气带内所含水的热容量值为 6.5×10¹² kJ/°C,包气带岩土体内热容量为 1.67×10¹³ kJ/°C;其中饱水带中饱水带热容量值为 1.78×10¹⁵ kJ/°C,水的为 7.78×10¹⁴ kJ/°C,岩土体为 9.99×10¹⁴ kJ/°C。

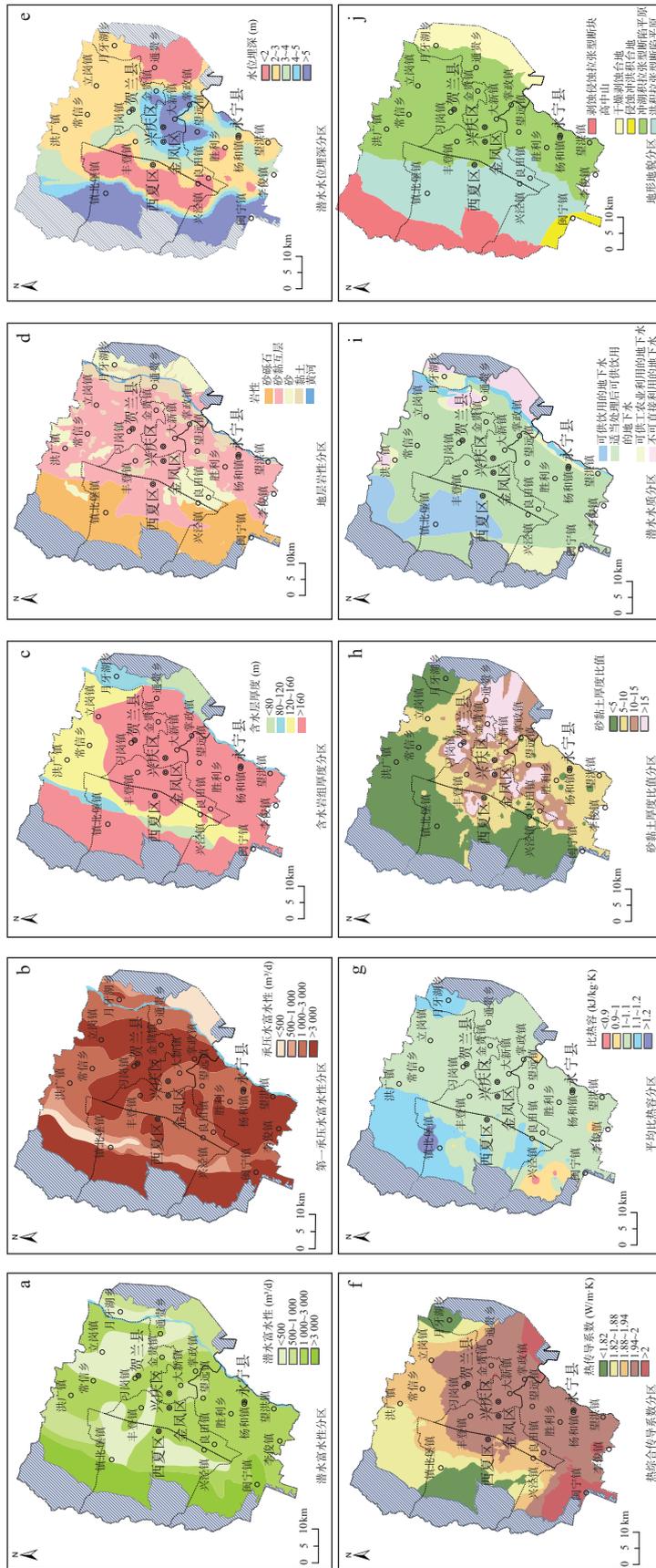


图 8 评价因子分区图
Fig. 8 Assessment factor zoning map

表 3 评价因子权重计算结果一览表

Tab. 3 List of calculation results of evaluation factor weights

目标层(对象层)					
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	
指标层	水文地质条件	热物理性质	水质条件	地质环境条件	组合权重
	0.338	0.338	0.162	0.162	
C ₁ 潜水富水性	0.417				0.141
C ₂ 承压水富水性	0.272				0.092
C ₃ 潜水位埋深	0.188				0.064
C ₄ 含水岩组厚度	0.123				0.042
C ₅ 热综合热传导系数		0.5			0.169
C ₆ 平均比热容		0.5			0.169
C ₇ 地下水水质			1.000		0.162
C ₈ 地层结构				0.333	0.054
C ₉ 地形地貌				0.333	0.054
C ₁₀ 砂黏土厚度比值				0.333	0.054

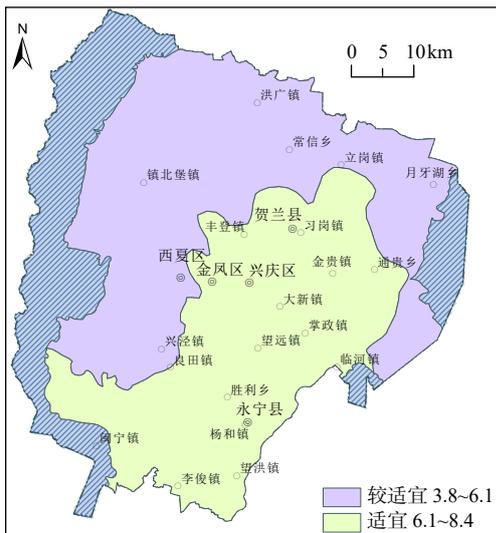


图 9 地埋管地源热泵适宜性分区图

Fig. 9 The suitability zoning map of underground pipe ground source heat pump

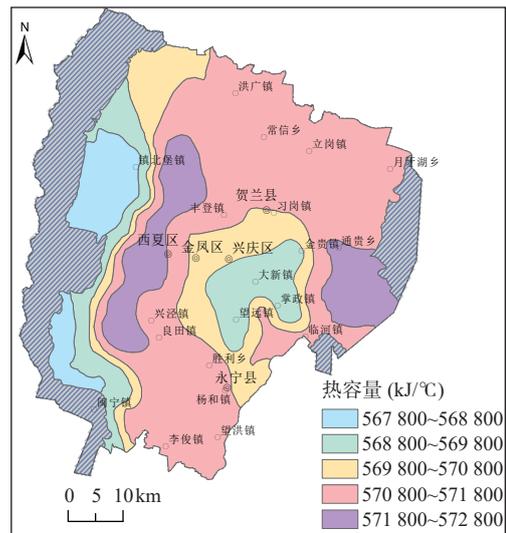


图 10 浅层地温能热容量分布图

Fig. 10 Heat capacity distribution of shallow geothermal energy

3.2 浅层地温能换热功率计算

3.2.1 计算方法

根据地埋管换热器传热系数和热导率等通过现场热响应试验获取的基础数据,对单孔的换热功率进行计算分析。然后综合埋管的单孔换热功率,结合土地利用系数计算分析调查区较适宜区及适宜区的总换热功率(可利用总量)。它的单孔换热功率的计算公式为:

$$D = \frac{2\pi L|t_1 - t_4|}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}$$

式中: D 为单孔换热功率(W); L 为埋管换热器长度(m), 取值 200; t_1 为埋管内流体的平均温度(°C), 夏季取值为 31.5, 冬季取值为 6.4; t_4 为温度影响半径之外岩土体的温度(°C), 取值为 15.55; λ_1 为埋管材料的热导率 [$W/(m \cdot ^\circ C)$], HDPE 管为 0.44 $W/(m \cdot ^\circ C)$; r_2 为埋管束的等效外径(m), 等效半径 r_1 加管材壁厚, 取值为 0.04; r_1 为埋管束的等效半径(m), 单 U 管为管内径的 $\sqrt{2}$ 倍, 双 U 管为管内径的 2 倍, 取值为 0.037; λ_2 为换热孔中回填料的热导率 [$W/(m \cdot ^\circ C)$], 取值为 2.0; r_3 为换热孔平均半径(m), 取值为 0.1; λ_3 为

换热孔周围岩土体的平均热导率 $[W/(m \cdot ^\circ C)]$, 取值为 2.2; r_4 为换热温度影响半径(m), 取值为 3.0。在获得单孔换热功率后, 考虑银川市地理管土地利用系数取 8.0%, 布井间距考虑为 5 m。

3.2.2 计算结果

不同工况下地理管地源热泵单孔换热功率结果表示, 经上节的参数确定后计算得到的理论值(表 4)。冬季单孔换热功率为 5 268.53 w, 夏季单孔换热功率为

9 183.94 w; 根据热响应测试结果得到的平均值, 冬季单孔换热功率为 6 720.00 w, 夏季单孔换热功率为 10 120.00 w。研究区根据总面积 3 154 km², 考虑土地利用系数和布井间距, 设置总的孔数约 10 131 537 个。各工况中按理论值计算, 冬季换热总功率为 5.34×10^7 kw, 夏季换热总功率为 9.30×10^7 kw; 按热响应测试结果平均值计算, 冬季换热总功率为 6.81×10^7 kw, 夏季换热总功率为 1.03×10^8 kw。

表 4 地理管地源热泵换热功率

Tab. 4 Heat transfer power of ground source heat pump with buried

工况	单孔换热功率 (w)	面积 (km ²)	总的孔数n (考虑土地利用系数)	总的功率 (kw)
夏季(按理论计算)	9 183.94	3 154	10 131 537.22	9.30×10^7
夏季(按试验平均值)	10 120.00	3 154	10 131 537.22	1.03×10^8
冬季(按理论计算)	5 268.53	3 154	10 131 537.22	5.34×10^7
冬季(按试验平均值)	6 720.00	3 154	10 131 537.22	6.81×10^7

3.3 浅层地热能潜力评价

3.3.1 计算方法

根据宁夏气温及公建及民间的制冷特征, 新建筑与老建筑节能效果的不同, 按照公建 60%, 民建 40%, 老建筑用原来的指标, 新建筑用节能指标, 各按 50% 计算, 不考虑消峰。根据公建与民建新老建筑冬、夏季不同负荷, 按相应百分比取值, 夏季制冷负荷为 69 w/m², 冬季供暖负荷为 47 w/m²。最后利用研究区较适宜区、适宜区冬季和夏季换热功率, 通过单位可利用量的供暖和制冷面积以标明资源潜力。

3.3.2 计算结果

根据对调查区地热地质资料分析及获得的相关土壤热物性参数、通过层次分析法得出调查区内无地理管地源热泵不适宜区, 故在整个调查区内计算了地理管地源热泵开发潜力值, 总面积为 3 154 km²。经过地理管地源热泵较适宜区、适宜区内的换热功率最终成果的分析, 地理管地源热泵冬季总可供暖面积约为 1.13×10^9 m², 夏季可制冷面积为 1.34×10^9 m²(表 5)。调查区范围内地理管地源热泵利用和开发潜力很大, 夏季开发潜力为 42.5 万 m²/km², 冬季开发潜力 35.8 万 m²/km²。

表 5 地源热泵可供暖面积计算

Tab. 5 Calculation of heating area of ground source heat pump

工况	负荷q (w/m ²)	可供面积 (m ²)	资源潜力Qz (m ² /km ²)
夏季	69	1.35×10^9	427 339
冬季	47	1.14×10^9	360 232

4 开发利用建议

近十年越来越多的地质矿产勘查单位对宁夏浅层地温能进行调查研究, 如今的浅层地温能开发利用技术已经基本成熟(张鹏川等, 2017), 为开采浅层地温能提供大量基础资料, 说明银川市浅层地温能的开发是可行的。考虑到银川市浅层地温能赋存在 200 m 以浅的第四系地层内, 浅层地温能热容量分布最高的区域分布在银川城区外的东部和西部, 热容量大于 571 800 KJ/($^\circ C \cdot m^2$), 而越往研究区中部和西部热容量越来越低。

根据所得银川市地理管地源热泵适宜性分区结果可知, 在整个研究区内没有不适宜区, 研究区北部为适宜区, 其中适宜区面积略小于较适宜区面积, 银川市未来城市的商业发展中心将往北发展, 南部将以住宅区为主。因此, 在北部主要商业办公大楼、商场、宾馆、文化娱乐、教育科研、行政办公等均可采用地理管地源热泵。在开发利用方式上, 地理管的埋管形式以传统垂直双 U 为主, 可以考虑与其他方式的补充。例如, 与能源桩的结合和与路基工程的结合。

5 结论

(1) 研究区总面积为 3 154 km², 根据工作收集及试验获得水文地质参数、地热地质参数, 并且在研究

区的埋管地源热泵认识的基础上, 划分适宜性分区、计算资源量, 其中整个研究区仅划分为2个分区, 分别是适宜区和较适宜区。最佳建造埋管热泵开采和使用浅层地热能区域是适宜区, 面积为1 767 km², 占比为56.04%; 较适宜区可综合考虑当地社会发展状况和经济条件, 根据需求程度建造地源热泵, 面积为1 386 km², 占比为43.96%。

(2) 采用热储法计算研究区内200 m以浅地层综合热容量值, 其中包气带总热容量为 2.32×10^{13} kJ/°C, 饱水带中饱水带热容量值为 1.78×10^{15} kJ/°C。

(3) 研究区埋管地源热泵中的较适宜区和适宜区的夏季制冷负荷为69 w/m², 冬季供暖负荷为47 w/m²; 冬季换热功率为 5.34×10^7 kw, 夏季换热功率为 9.30×10^7 kw; 夏季可制冷面积为 1.35×10^9 m², 冬季总可供暖面积约为 1.14×10^9 m²。研究区开发潜力计算得到夏季开发潜力为42.7 万 m²/km², 冬季开发潜力36.0 万 m²/km²。

参考文献(References):

- 丁宏伟, 魏莉莉, 尹政, 等. 浅层地热能系统的国内外研究与应用现状综述[J]. 甘肃地质, 2016, 25(04): 61-68.
- DING Hongwei, WEI Lili, YIN Zheng, et al. Overview of research and application status of shallow geothermal energy systems at home and abroad[J]. Gansu Geology, 2016, 25(04): 61-68.
- 董殿伟, 江剑, 王立发, 等. 北京市平原区地源热泵系统适宜性分区评价[J]. 北京水务, 2010, (02): 12-14.
- DONG Dianwei, JIANG Jian, WANG Lifa, et al. Evaluation of suitability of ground-source heat pump system in plain area of Beijing[J]. Beijing Water, 2010, (02): 12-14.
- 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 等. 浅层地热能勘查评价[J]. 中国地质, 2007, (06): 1115-1121.
- HAN Zaisheng, RAN Weiyan, TONG Hongbing, et al. Evaluation of shallow geothermal energy exploration[J]. Geology in China, 2007, (06): 1115-1121.
- 胡元平, 刘红卫, 柯立, 等. 层次分析法在武汉都市发展区埋管地源热泵适宜性分区评价中的应用[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(01): 59-62.
- HU Yuanping, LIU Hongwei, KE Li, et al. Application of analytic hierarchy process (AHP) in zoning evaluation of ground source heat pump suitability in Wuhan urban development area[J]. Resources Environment & Engineering, 2015, 29(01): 59-62.
- 金婧, 席文娟, 陈宇飞, 等. 基于AHP的浅层地热能适宜性分区评价[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(03): 91-93.
- JIN Jing, XI Wenjuan, CHEN Yufei, et al. Evaluation of the suitability of shallow geothermal energy based on AHP[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(03): 91-93.
- 兰善治. 利用层次分析法评价德州市浅层地热能适宜性[J]. 科技视界, 2016, (19): 214-215.
- LAN Shanzhi. Using Analytic Hierarchy Process to Evaluate the Suitability of Shallow Geothermal Energy in Dezhou City[J]. Science and Technology Vision, 2016, (19): 214-215.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(01): 312-321.
- LIN Wenjing, LIY Zhiming, WANG Wanli, et al. China's geothermal resources and their potential evaluation[J]. Geology in China, 2013, 40(01): 312-321.
- 刘建霞, 原晓军, 索立涛. 基于层次分析法的鲁东地区浅层地热能适宜性评价[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(10): 65-70.
- LIU Jianxia, YUAN Xiaojun, SUO Litao. Appraisal of shallow geothermal energy suitability in eastern Shandong based on analytic hierarchy process[J]. Marine Geological Frontiers, 2012, 28(10): 65-70.
- 刘文辉, 董英, 张新社, 等. 西北省会城市地热中深层埋管供热系统发展潜力及环境效益分析[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 186-195.
- LIU Wenhui, DONG Ying, ZHANG Xinshe, et al. Development Potential and Environmental Benefit Analysis of Geothermal Medium-Deep Buried Pipe Heating System in Capital Cities in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 186-195.
- 栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 浅层地热能资源开发利用发展综述[J]. 地质与勘探, 2013, 49(02): 379-383.
- LUAN Yingbo, ZHENG Guisen, WEI Wanshun. Summary of the development and utilization of shallow geothermal energy resources[J]. Geology and Prospecting, 2013, 49(02): 379-383.
- 彭佳, 田小林, 刘杰, 等. 贵州省浅层地热能开发利用现状浅析[J]. 广西节能, 2021, (02): 42-43.
- PENG Jia, TIAN Xiaolin, LIU Jie, et al. Analysis of the current status of shallow geothermal energy development and utilization in Guizhou[J]. Guangxi Energy Conservation, 2021, (02): 42-43.
- 冉伟彦, 李宁波, 杨俊伟, 等. 城市浅层地热能勘查评价工作的几点启示[J]. 城市地质, 2014, 9(S1): 1-3.
- RAN Weiyan, LI Ningbo, YANG Junwei, et al. Some enlightenments on the exploration and evaluation of urban shallow geothermal energy[J]. Urban Geology, 2014, 9(S1): 1-3.
- 沈军, 刘徽, 余国飞, 等. 浅议中国浅层地热能开发利用现状及对策建议[J]. 资源环境与工程, 2021, 35(01): 116-119.
- SHEN Jun, LIU Hui, YU Guofei, et al. Discussion on the current situation and countermeasures of shallow geothermal energy development and utilization in China[J]. Resources Environment

- & Engineering, 2021, 35(01): 116–119.
- 孙明远, 杨霞, 邵琦. 章丘区浅层地温能资源研究与评价——以埋管换热方式为例[J]. 山东国土资源, 2021, 37(04): 48–53.
- SUN Mingyuan, YANG Xia, SHAO Qi. Research and Evaluation of Shallow Geothermal Energy Resources in Zhangqiu District: Taking the Underground Pipe Heat Exchange Method as an Example[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(04): 48–53.
- 王贵玲, 蔺文静, 张薇. 我国主要城市浅层地温能利用潜力评价[J]. 建筑科学, 2012, 28(10): 1–3+8.
- WANG Guiling, LIN Wenjing, ZHANG Wei. Evaluation of shallow ground temperature energy utilization potential in major cities in my country[J]. Building Science, 2012, 28(10): 1–3+8.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(01): 1–9.
- WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. Current status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(01): 1–9.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(04): 449–450+134+451–459.
- WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of China's Geothermal Resource Potential[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(04): 449–450+134+451–459.
- 王婉丽, 王贵玲, 朱喜, 等. 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价[J]. 中国地质, 2017, 44(06): 1062–1073.
- WANG Wanli, WANG Guiling, ZHU Xi, et al. Development and utilization conditions and potential evaluation of shallow geothermal energy in provincial capitals of China[J]. Geology in China, 2017, 44(06): 1062–1073.
- 闫福贵. 呼和浩特市浅层地温能开发利用适宜性评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- YAN Fugui. Suitability evaluation of shallow geothermal energy development and utilization in Hohhot [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- 杨如辉, 邹声华, 刘彩霞. 浅层地热能开发利用[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2011, 26(02): 69–72.
- YANG Ruhui, ZOU Shenghua, LIU Caixia. Development and Utilization of Shallow Geothermal Energy[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Science Edition), 2011, 26(02): 69–72.
- 苑雷, 陈刚. 改进层次分析法下的浅层地温能适宜性评价[J]. 可再生能源, 2013, 31(07): 112–115.
- 张甫仁, 彭清元, 朱方圆, 等. 重庆主城区浅层地温能资源量评价研究[J]. 中国地质, 2013, 40(03): 974–980.
- ZHANG Furen, PENG Qingyuan, ZHU Fangyuan, et al. Evaluation of Shallow Geothermal Energy Resources in Chongqing Urban Area[J]. Geology in China, 2013, 40(03): 974–980.
- 张茂省, 董英, 孙萍萍, 等. 城乡融合与地上地下空间协同探测评价的理论与方法以关中平原城市地质调查评价为例[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 153–168.
- ZHANG Maosheng, DONG Ying, SUN Pingping, et al. Theory and Method for Urban–Rural Integration, Evaluation and Cooperative Detection of Ground and Underground Space: Example from the Urban Geological Survey of Guanzhong Plain[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 153–168.
- 张鹏川, 褚小东, 曾建平, 等. 传统资源量估算方法在第三类矿产中的应用与对比研究: 以宁夏某建筑用石灰岩矿山为例[J]. 中国矿业, 2017, 26(09): 33–37+41.
- ZHANG Pengchuan, CHU Xiaodong, ZENG Jianping, et al. Application and comparative study of traditional resource estimation methods in the third kind of minerals: taking a limestone mine for construction in Ningxia as an example[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(09): 33–37+41.
- 张新. 贵安新区浅层地温能资源开发利用适宜性分区及潜力评价[J]. 地下水, 2021, 43(03): 83–85.
- ZHANG Xin. Suitability zoning and potential evaluation of shallow geothermal energy resources development and utilization in Gui'an New Area[J]. Ground Water, 2021, 43(03): 83–85.