

江苏徐州城市规划区浅层地温能潜力评价及环境效益分析

刘爱斌, 翟如伟, 景家俊, 陶文杰

江苏省地质矿产局第五地质大队, 江苏 徐州 221004

摘 要: 浅层地温能属于清洁、安全、可再生的地热资源, 是国家重点支持开发利用的能源方向. 徐州城市规划区总面积 3157 km², 主城区面积 641 km². 通过调查规划区水文地质-工程地质钻探、热物性试验、施工钻孔热响应试验等工作手段, 大致查明了规划区浅层地温能赋存的地质背景、形成条件、分布规律及地温场特征, 进行浅层地温能开发利用适宜性分区, 进而进行浅层地温能资源潜力评价及环境效益分析. 根据评价分析结果, 若徐州市城市规划区的浅层地温能资源全部开发利用, 节能减排效益十分可观.

关键词: 浅层地温能; 城市规划区; 地温能容量; 节能减排; 经济效益; 江苏徐州

POTENTIAL ASSESSMENT AND ENVIRONMENTAL BENEFIT ANALYSIS OF SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY IN THE URBAN PLANNING AREA OF XUZHOU, JIANGSU PROVINCE

LIU Ai-bin, ZHAI Ru-wei, JING Jia-jun, TAO Wen-jie

No. 5 Geological Party, Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Xuzhou 221004, Jiangsu Province, China

Abstract: Shallow geotherm is a kind of clean, safe and renewable energy. The urban planning area of Xuzhou City, Jiangsu Province, covers a total area of 3157 km², including 641 km² of downtown area. Based on the hydrogeological and engineering geological drilling, thermal property test and thermal response test in the planning area, this paper recognizes the geological background, forming conditions, distribution and geothermal field characteristics, and divides the suitability zones for exploitation and utilization of shallow geothermal energy, then evaluates the resources potential and analyzes the environmental benefits. The results show that the energy saving and pollution reduction effect is considerable.

Key words: shallow geothermal energy; urban planning area; ground temperature; energy saving and pollution reduction; Xuzhou City; Jiangsu Province

0 引言

浅层地温能是指地表以下一定深度范围内, 温度低于 25 ℃, 在当前技术经济条件下具备开发利用价值的地球内部的热能资源, 是地热资源的重要组成部分^[1-2], 属清洁、安全、可再生能源, 是国家重点支持开

发利用的能源方向. 全面开发利用浅层地温能将产生巨大的节能减排效益, 对促进城市规划区可持续发展, 减少煤炭石油等高碳能源消耗, 减少温室气体排放, 达到经济社会发展与生态环境保护双赢的一种经济发展形态具有重要意义^[3].

收稿日期: 2016-09-07; 修回日期: 2017-01-16. 编辑: 张哲.

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局科技改基金项目“徐州城市规划区浅层地温能赋存条件及适宜性分区研究”(项目编号 2015-KY-6).

作者简介: 刘爱斌 (1969—), 男, 高级工程师, 注册岩土工程师, 主要从事水工环及地热地质工作, 通信地址 江苏省徐州市金水路 9 号, 221004, E-mail//195691897@qq.com

1 浅层地温能赋存条件

1.1 自然地理特征

徐州位于江苏省北部,地处黄泛平原,同时又位于鲁南山区南缘. 总体地形特征: 西北和东南部为平原区,中东部和西南部为低山丘陵及山前、山间平原区. 黄泛冲积平原分布于废黄河两侧,地势低平,地面标高 26.40~37.00 m, 地势总体微向东南倾斜. 按地貌成因和形态特征,可划分为剥蚀堆积地貌、堆积平原和冲积垄状高地三大类型. 徐州市地处北亚热带与暖温带之间过渡带,属湿润-半湿润季风气候区,日照充足,四季分明. 徐州年气温 14 °C, 一月平均气温-0.7 °C,七月平均气温 27 °C, 年均降水量 800~930 mm,最大年降水量为 1297 mm,最小年降水量为 259.5 mm. 本次评价徐州城市规划区总面积 3157 km²,主城区面积 641 km².

1.2 地层结构特征

徐州城市规划区内第四系分布较广泛,规划区内沉积类型有冲积、冲湖积、冲洪积、湖沼积、坡洪积等. 规划区第四纪地层划分方案见表 1. 受基岩起伏面和古地理环境的变化影响,其厚度变化较大:微山湖-卧牛山以西为 40~140 m,潘塘-棠张一带 40~65 m,其他地区 10~40 m (图 1).

1.3 浅层地温场分布特征

1.3.1 地温场垂向分布

地壳浅层地温场在垂向上的变化特征受地层岩性、结构、孔隙度、当地气候、地下水活动等多种因素的影响,自上而下依次为变温带、恒温带和增温带^[4-7]. 徐州城市规划区恒温带温度 16.6~17.1 °C,埋深 20~30 m,恒温带温度比徐州年平均气温略高 2.6~3.1 °C,浅部地温梯度 2.0~2.3 °C/hm. 变温带地温场受太阳辐射变化

的影响,呈现出昼夜和季节性变化特征(图 2、3). 变温带的温度与气温呈现高度一致性,可见地温的变化受气温影响,变幅小于气温.

根据徐州地区煤矿勘探及其他勘探资料统计,徐州及丰沛地区的千米地温,最高为 49.00 °C,平均 39.19 °C,地温梯度平均最高 2.81 °C/hm,平均 2.28 °C/hm. 不仅低于华北准地台,也低于江苏省的平均水平. 但在单孔中存在局部地温梯度异常,如柳泉景山勘查区,900~1000 m 地温梯度达到 5.27 °C/hm;潘塘盆地中施工的两个钻孔,在 1600 m 以下地温异常明显,地温梯度平均 4.3~10.73 °C/hm.

1.3.2 地温场平面分布

从地温等值线图(图 4)以及测温数据可以得出以下结论:规划区 20 m 埋深深度的地温普遍低于 19 °C,温度范围基本在 17.0~19.0 °C. 规划区温度规律大致是西高东低.

1.3.3 岩土热物性及地温场岩土热响应

规划区第四系松散沉积物比热容室内测试结果范围大致在 1.50~1.64 kJ/(kg·K),导热系数室内测试结果范围大致在 1.71~1.87 W/(m·K);基岩比热容室内测试结果范围大致在 0.89~1.61 kJ/(kg·K),导热系数室内测试结果范围大致在 1.34~2.81 W/(m·K). 根据热响应实验结果,岩土体导热系数主要受岩性影响,不同岩性的岩土样其热物性有明显差异. 单孔换热量夏季为 62~78 W/m,冬季 46~50 W/m. 潘塘盆地换热量较低,仅相当于其余区域的 70%左右.

1.4 埋管地源热泵系统适宜性分区

目前对浅层地温能资源开发主要的利用方式为地下水地源热泵系统和埋管地源热泵系统. 徐州目前

表 1 徐州城市规划区第四系地层表

Table 1 Quaternary stratigraphy of the urban planning area of Xuzhou

岩石地层单位	成因类型		厚度/m	沉积岩相简述	
	平原区	丘陵区		平原区	丘陵区
全新世大墩组	冲-湖积(Q _h ^{al-1}) 湖-沼积(Q _h ^{al-1})	冲-洪积(Q _h ^{al-1})	2~23	灰色砂黏土或黏土 砂黏土、黏砂土、粉砂土	黄棕、灰色黏土或砂黏土
晚更新世戚咀组	冲-湖积(Q _l ^{al-1}) 冲-洪积(Q _l ^{al-1})	冲-洪积(Q _l ^{al-1}) 坡-洪积(Q _l ^{al-1})	20~40	黄褐色砂黏土、黏土	
中更新世泊岗组	冲-洪积(Q _l ^{al-1}) 冲-湖积(Q _l ^{al-1})	坡-洪积(Q _l ^{al-1})	15~30	棕黄色含砾砂质黏土、砾石层	黄褐色含钙质结核亚黏土、中粗砂褐黄色含钙质结核砂黏土、黏土
早更新世豆冲组	冲-湖积(Q _l ^{al-1})		0~20	亚黏土、含砾中粗砂	

主要参考徐州市等四幅 1:5 万区调报告,综合前五段等四幅、台儿庄等四幅 1:5 万区调报告.

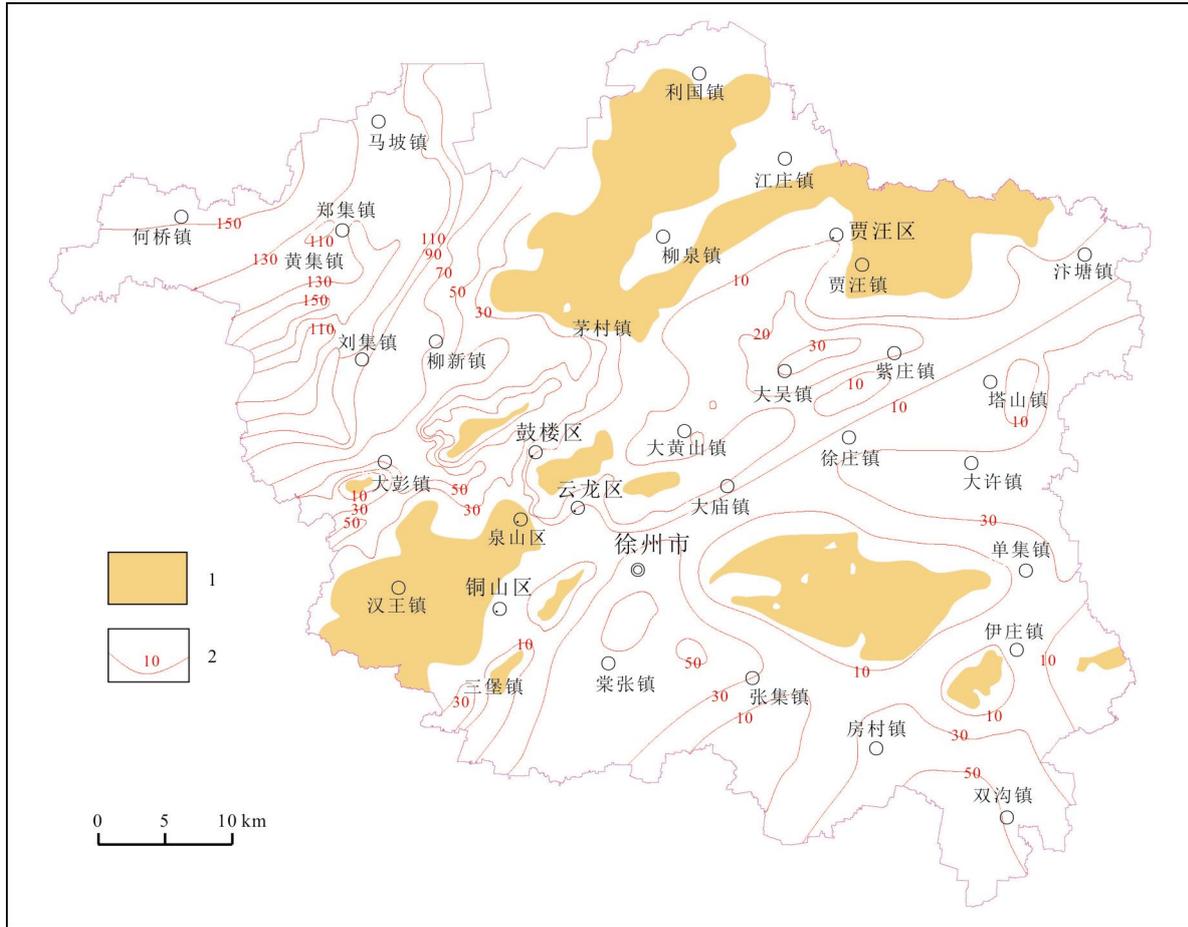


图 1 徐州城市规划区第四纪沉积厚度等值线略图

Fig. 1 Isopach map of Quaternary sedimentary in the urban planning area of Xuzhou

1—山区及基岩裸露区(mountainous and bedrock exposed area);2—第四纪等厚线(isopach of Quaternary)

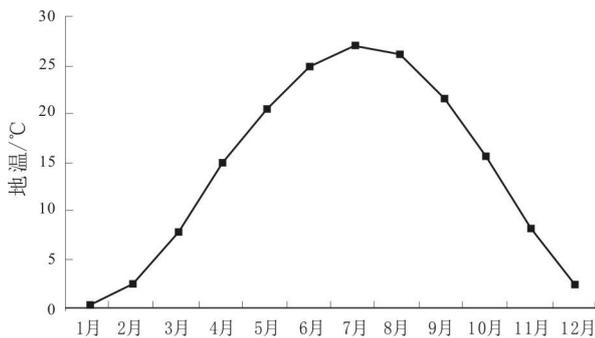


图 2 徐州城市规划区地面温度-时间曲线

Fig. 2 Surface temperature-time curve of the urban planning area of Xuzhou

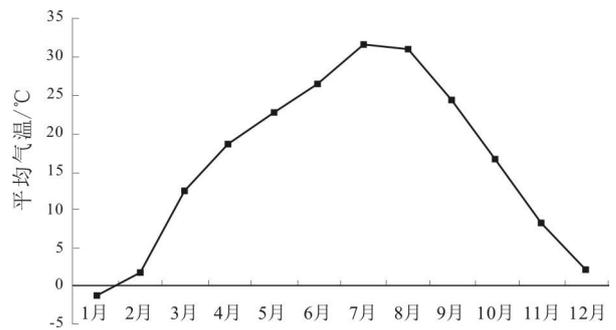


图 3 徐州城市规划区平均气温-时间曲线

Fig. 3 Average temperature-time curve of the urban planning area of Xuzhou

城市覆盖率较高区均处于第四系厚度小于 100 m 区域,地层岩性以灰岩为主,地下水资源丰富,但属于徐州市城市供水水源. 该区域属地下水源保护区, 不具备地下水源热泵开发利用条件,仅适宜采用地埋管式

地源热泵开发利用浅层地温能. 因此将徐州城市规划区地埋管地源热泵的适宜性分区均划分为 3 级: 适宜区、较适宜区及不适宜区. 根据适宜性分区图(图 5), 徐州城市规划区地埋管换热适宜区域面积为

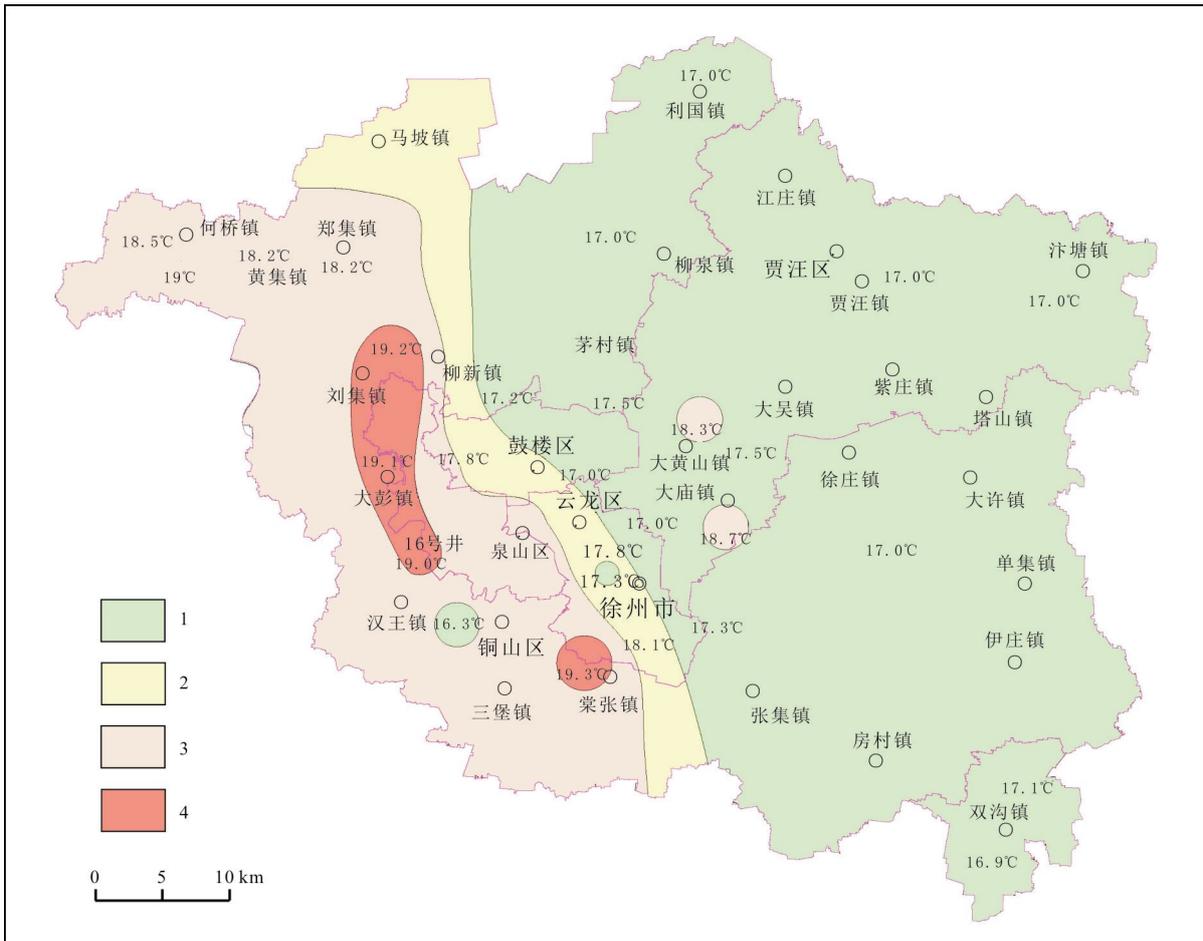


图4 20 m 深度地温等值线图

Fig. 4 Isopleth map of ground temperature at 20 m depth

1—地温小于等于 17.5 °C ($\le 17.5^\circ\text{C}$); 2—地温 17.5~18.0 °C (17.5~18.0 °C); 3—地温 18.0~19.0 °C (18.0~19.0 °C); 4—地温大于等于 19.0 °C ($\ge 19.0^\circ\text{C}$)

359.4 km², 主要分布在规划区的西北部; 较适宜区面积为 2438.7 km², 整个规划区大部分区域都有分布; 不适宜区面积为 359.3 km², 零星分布在规划区各个区域, 不适宜区主要位于第四系厚度在 30~50 m 且含水层总厚度小于 10 m 的区域, 不利于浅层地温的富集与储存.

2 浅层地温能资源潜力评价

2.1 评价方法

本次评价将在适宜性分区的基础上, 结合浅层地温能的可利用量, 考虑地源热泵的能效比 (COP 和 EER), 采用单位面积可利用量的供暖和制冷面积表示^[8-10].

由于浅层地温能需要通过地源热泵系统才能用于建筑的制冷和供暖, 故从地下提取的热量或冷量并不等同于建筑得到的热量或冷量^[11]. 根据《地源热泵系

统工程技术规范 (GB50366-2005)》^[12], 在不考虑输过程的热量得失和水泵自身释放热量的前提下, 夏季的排热量和冬季的取热量分别按下式估算:

$$\text{夏季释热量} = \sum [\text{建筑冷负荷} \times (1 + 1/\text{EER})] \quad (1)$$

$$\text{冬季吸热量} = \sum [\text{建筑热负荷} \times (1 - 1/\text{COP})] \quad (2)$$

式中, EER 为地源热泵机组的制冷性能系数; COP 为地源热泵机组的供热性能系数.

根据相应区域的可开采资源量, 估算区域内的埋管地源热泵可应用建筑面积, 并得出单位面积的可应用建筑面积.

2.2 参数选取

1) 建筑供暖与制冷的负荷

当地普通住宅冬季热负荷、夏季冷负荷指标分别为 50 W/m², 80 W/m².

2) 地源热泵机组的制冷性能系数和供热性能系数

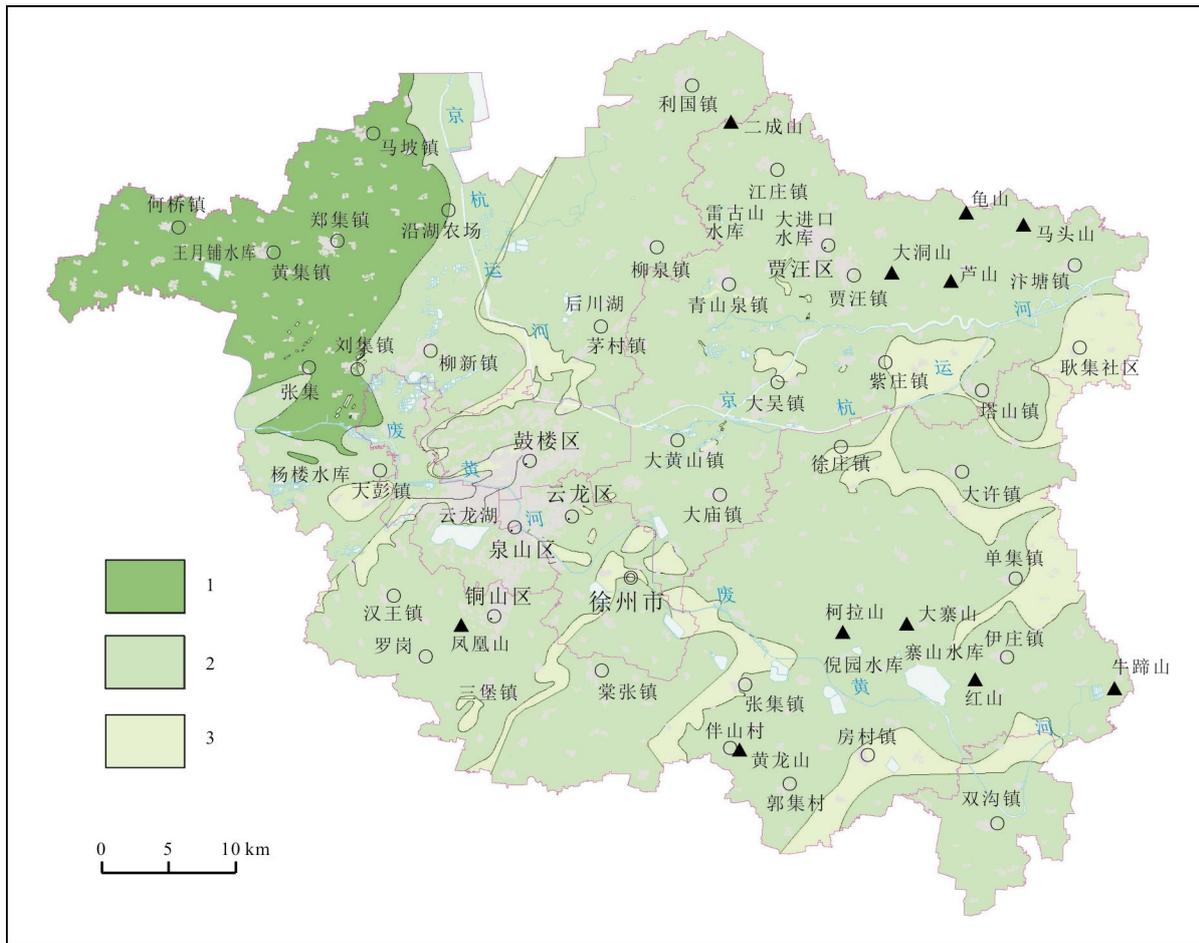


图5 地埋管换热适宜性分区图

Fig. 5 Suitability zonation of ground heat exchange system

1—适宜区(suitable); 2—较适宜区(relatively suitable); 3—不适宜区(unsuitable)

根据江苏省工程建设标准《地源热泵系统工程技术规程(DGJ32TJ89-2009)》^[13]的相关规定,确定地源热泵系统的EER一般为3.45~5.20,而COP一般为3.25~4.80.结合江苏地区浅层地温能开发利用的实际情况,确定徐州城市规划区地源热泵系统的EER和COP统一按照4.0考虑.

3) 夏季排热量和冬季取热量

根据建筑供暖与制冷的负荷、地源热泵机组的EER和COP,得出徐州城市规划区的浅层地温能开发利用建筑在一般情况下,冬季从地下取热为37.5 W/m²,夏季向地下排热为100 W/m².

2.3 地埋管地源热泵系统潜力评价

根据评价方法与参数选取情况,按可采资源换热功率评价结果估算得到在考虑土地利用系数情况下的规划区地埋管地源热泵系统的潜力.按可采资源换热功率评价结果,规划区地埋管地源热泵的夏季总制冷

面积为 4.42×10^8 m²,冬季总供暖面积为 8.14×10^8 m².按照单位制冷面积评价估算,规划区地埋管地源热泵的潜力位于 $9.06 \times 10^4 \sim 44.8 \times 10^4$ m²/km².其中潜力高的区域主要分布在泉山区大部分区域、鼓楼区大部分区域、云龙区大部分区域,总面积约为254.5 km²,占规划区总面积的9.10%,单位可制冷面积为 $22.1 \times 10^4 \sim 44.8 \times 10^4$ m²/km²;潜力中等的区域主要分布贾汪区和铜山区,总面积约为2459.27 km²,占规划区总面积的87.89%,单位可制冷面积为 $13.2 \times 10^4 \sim 14.6 \times 10^4$ m²/km²;潜力低的区域主要分布在睢宁县双沟镇以及铜山区棠张镇,总面积约为84.33 km²,占规划区总面积的3.01%,单位可制冷面积为 $9.06 \times 10^4 \sim 1.05 \times 10^4$ m²/km².

综上所述,规划区冬夏季制暖制冷面积较大,但按照单位制冷面积评价估算可知,区域内大部分区域位于潜力中等区域,潜力高的区域较小,潜力低的区域更小,故区域地埋管热泵系统潜力较高.

3 环境效益分析

3.1 估算分析方法

规划区位于徐州市城市供水水源,属地下水源保护区,不具备地下水源热泵开发利用条件,仅适宜采用埋管式地源热泵开发利用浅层地温能,故全区采用埋管地源热泵系统开采浅层地温能.综合夏天制冷和冬天供暖的实际情况,浅层地温能开发利用的总能量为:

$$Q=g+h \quad (3)$$

式中, g —夏季交换量(kJ); h —冬季交换量(kJ).其中:

$$g=3600 \times a \times c \times d \left(1 + \frac{1}{COP_x}\right); h=3600 \times b \times e \times f \left(1 + \frac{1}{COP_D}\right).$$

a —夏季热泵系统换热功率(kW); b —冬季热泵系统换热功率(kW); c —热泵夏季制冷天数(d); d —夏季热泵运行小时数(h); e —热泵冬季制冷天数(d); f —冬季热泵运行小时数(h); COP_x —夏季热泵运行能效比系数; COP_D —冬季热泵运行能效比系数.

根据《综合能耗估算通则(GB/T2589-2008)》^[14]中原煤的折算系数,并考虑燃煤与换热效率等因素,选取转换系数0.6^[15]估算出浅层地温能资源开发利用量折算成的原煤量.

$$G=79.44Q \times 10^{-9} \quad (4)$$

$$G_B=56.87Q \times 10^{-9} \quad (5)$$

式中, G —折合成原煤量(t/a); G_B —开发利用浅层地温能折合标准煤(t/a).

以此为基数参照《地热资源地质勘查规范(GB/T11615-2010)》^[16],估算浅层地温能开发利用排量带来的经济环境效益.浅层地温能的开发利用不仅节约了常规能源(煤炭、燃油等),还在很大程度上改善了环境质量,减少了常规能源使用带来的环境污染,如燃煤锅炉排放的烟雾、粉尘、二氧化硫等污染物,这些污染直接影响了大气环境,对生态也产生了直接的影响,损害了人类的生命健康.

但浅层地温能的开采同样要使用电能,因此,在本次评价中对环境效益的评价为扣除因开采浅层地温能造成的能源消耗.根据浅层地温能开发利用效率和实际燃煤的利用效率,应用浅层地温能的实际节煤量如表2所示,计算方法如下:

$$M=0.35 \times G \quad (6)$$

$$M_B=0.35 \times G_B \quad (7)$$

式中, M —开发利用浅层地温能实际节省的原煤量(t/a); M_B —开发利用浅层地温能实际节省的标准煤(t/a).

表2 浅层地温能开发利用节能减排折算表

Table 2 Energy saving and pollution reduction by shallow geothermal energy development and utilization

项目	参照值	CO ₂	SO ₂	NO _x	粉尘	煤渣
减排有害物质/kg	1	2.386	0.017	0.006	0.008	0.001
节省治理费用/(元/kg)	1	0.1	1.1	2.4	0.8	-

注:1 t 标准煤可以产生 29.3076 GJ 的热能;1 t 原煤可以产生 20.98 GJ 的热能.

煤渣可以被二次利用,如铺路、炼水泥等,故这里不作为有害物估算.

根据实际节煤情况,利用浅层地温能可减少向大气中排放煤灰、氮氧化物、二氧化硫、二氧化碳及减少环境治理费的估算公式如下所示:

$$\begin{cases} G_{CO_2}=2386M \\ G_{SO_2}=17M \\ G_{NO_x}=6M \\ G_{粉尘}=8M \\ G_{煤渣}=M \\ F=0.1G_{CO_2}+1.1G_{SO_2}+2.4G_{NO_x}+0.8G_{粉尘} \end{cases} \quad (8)$$

式中, G_{SO_2} —减少 SO₂ 的排放量 (kg); G_{NO_x} —减少 NO_x 的排放量(kg); G_{CO_2} —减少 CO₂ 的排放量(kg); $G_{粉尘}$ —减少粉尘的排放量 (kg); $G_{煤渣}$ —减少灰渣的排放量(kg); F —节省的环境治理费用(元).

3.2 考虑土地利用系数的节能减排效益分析

在考虑土地利用系数的情况下,规划区地源热泵冬季最大总换热功率为 3.05×10⁷ kW,夏季最大总换热功率为 4.42×10⁷ kW.结合徐州市的气象数据,综合考虑热平衡问题,采取估算参数如表3.

表3 估算参数

Table 3 Calculation parameters

项目	夏天				冬天			
	a/kW	c/d	d/h	COP _x	b/kW	e/d	f/h	COP _D
参数值	4.42×10 ⁷	90	10	4.0	3.05×10 ⁷	90	10	4.0

由此估算得出规划区浅层地温能全部开发利用,相当于每年节约标煤量约 602×10⁴ t.此外,每年将减

少 CO₂ 排放约 1436.8×10⁴ t, 减少 SO₂ 排放约 10.2×10⁴ t, 减少 NO_x(氮氧化合物)排放约 3.6×10⁴ t, 减少悬浮质粉尘约 4.8×10⁴ t, 减少灰渣排放 0.6×10⁴ t, 节省环境治理费约 16.7 亿元, 节能减排效益十分可观。

4 结 论

1) 徐州市城市规划区地处气候寒冷地区, 冬天和夏天都较长, 建筑供暖与制冷的需求很大。规划区第四系分布较广泛, 但受基岩起伏面和古地理环境的变化影响, 厚度变化较大, 100 m 深度范围内岩土体的平均导热系数一般为 1.46~2.44 W/m·K; 规划区 20 m 埋深深度的地温普遍低于 19 ℃, 温度范围基本在 17.0~19.0 ℃。规划区温度规律大致是西高东低。徐州市城市规划区适宜进行地源热泵系统开发利用的总面积约为 2798.1 km², 占全区面积的 88.63%。

2) 规划区 100 m 深度范围内单位温差的浅层地温容量为 8.11×10¹⁴ kJ/℃, 合标准煤 27 672×10⁴ t。在考虑土地利用系数的情况下, 规划区 100 m 深度埋管地源热泵系统的夏季总换热功率为 4.42×10⁷ kW, 可制冷面积为 4.42×10⁸ m²; 冬季总换热功率为 3.05×10⁷ kW, 可供暖面积为 8.14×10⁸ m²。

3) 若徐州市城市规划区的浅层地温能资源全部开发利用, 相当于节约标煤量约 10 665×10⁴ t。每年将减少 CO₂ 排放约 25 447.0×10⁴ t, 减少 SO₂ 排放约 181.3×10⁴ t, 减少 NO_x(氮氧化合物)排放约 64.0×10⁴ t, 减少悬浮质粉尘约 85.3×10⁴ t, 减少灰渣排放 10.7×10⁴ t, 节省环境治理费约 296.6 亿元, 节能减排效益十

分可观。

参 考 文 献:

- [1] DZ/T 0225-2009. 浅层地热能勘察评价规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [2] 韩再生, 冉伟彦. 城市地区浅层地温能评价方法探讨[J]. 城市地质, 2007, 2(4): 10-16.
- [3] 胡平放, 朱娜, 袁东立, 等. 地源热泵埋管换热系统热堆积分析[J]. 土木工程与管理学报, 2008, 25(1): 24-27.
- [4] 徐辉. 夏热冬冷地区地源热泵系统运行特性分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [5] 李彦花. 夏热冬冷地区地源热泵地域适宜性评价体系的研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2014.
- [6] 马勇. 地源热泵系统运行能效测评与能效影响因素的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
- [7] 余传辉. 地下土壤导热系数估算方法及结果分析[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [8] 杨志昆. 埋管地源热泵换热器的热响应测试与数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [9] 於仲义. 土壤源热泵垂直埋管换热器传热特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [10] 朱祖文. 地源热泵典型垂直埋管换热器数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [11] 郝小充, 余跃进, 毛炳文, 等. 岩土热响应试验在土壤源热泵系统设计中的应用[J]. 制冷学报, 2011, 32(6): 44-48.
- [12] GB50366-2005. 地源热泵系统工程技术规范[S]. 2005.
- [13] DGJ32/TJ89-2009. 江苏省地源热泵系统技术规程[S]. 2009.
- [14] GB/T2589-2008. 综合能耗计算通则[S]. 2008.
- [15] 郑克棣. 关于地热利用与节煤减排的计算方法[J]. 地热能, 2008(2): 24-24.
- [16] GB/T11615-2010. 地热资源地质勘查规范[S]. 2010.