

苏北平原区浅层地温能可开采资源量评价方法

彭逸平, 庞炳乾, 李 贵, 史云杰

(江苏省地质工程有限公司, 江苏 南京 210018)

摘要:随着地源热泵技术的推广应用, 浅层地温能作为新型可再生资源得到了重视, 对浅层地温能的资源评价业已展开。目前, 从浅层地温能赋存地区的地质特点出发, 分析其资源可开采量的研究尚不多见。重点介绍了浅层地温能可开采资源量的常规评价方法, 并针对苏北平原区的地质特点, 分析了在苏北平原区的具体地质特征下不同评价方法的适用性, 得出了地下水式地源热泵可开采资源量的适宜评价方法为地下水量折算法; 地理管式地源热泵可开采资源量的适宜评价方法为换热量现场测试法; 通过对本地区的工程案例分析, 验证了上述 2 种方法在苏北平原区浅层地温能可开采资源量评价中能取得较高的精度。

关键词:浅层地温能; 资源量评价; 地下水量折算法; 换热量现场测试法; 热传导法; 江苏北部

中图分类号:TE132.9

文献标识码:A

文章编号:1674-3636(2013)01-0110-06

0 引 言

近年来, 地源热泵技术得到了大规模应用, 而浅层地温能也被作为一种可再生的资源而被重视, 对浅层地温能资源可开采量的评价也逐渐展开。众多学者、专家对浅层地温能的有效开发和可持续利用展开了多方面的研究: 有学者就浅层地温能的评价方法及评价的重要性展开了研究, 总结了浅层地温能储量及可开采量的评价方法(韩再生等, 2007); 有的学者则就浅层地温能的开发利用对地质环境的影响程度进行监测、研究、分析, 认为岩土体温度场的变化与深度存在关系, 地温变化与系统的换热功率也相关(高新宇等, 2009); 有的学者对开展浅层地温能评价的重要性及紧迫性进行了探讨, 并对浅层地温能开发利用中的关键问题展开研究(卫万顺等, 2009); 等等。现有的研究均是从评价的理论方法(许苗娟等, 2009; 王贵玲等, 2011)及其开发利用的影响出发, 而对不同地质情况下浅层地温能的真正可利用量及其分布特点的探讨则较少。笔者结合典型的工程实例, 从不同地质特点区域对浅层地温能资源可开采量的影响角度出发, 分

析苏北平原区浅层地温能的可开采资源量, 并重点探讨可开采资源量的不同评价方法的适宜性。

长江下游平原区多由冲积而成, 包括苏南、苏北平原区, 杭嘉湖平原区等均具有相似的地质结构, 常具有较多的松散沉积物堆积, 形成由黏性土、砂性土、砂、砂砾层组成的岩土层, 常赋存有潜水和承压水, 地下水丰富, 平原区的这些特点对浅层地温能的赋存极为有利。就浅层地温能资源开发而言, 在平原区使用地源热泵技术具有成本低、易施工、效果好等优点; 另外, 苏北平原区是我国夏热、冬冷气候的典型地区, 具有全年冷热负荷量差别较小、岩土体蓄热、取热易于平衡等特点。因此, 在长江中下游平原区大规模推广地源热泵技术具有明显优势。

为了更加科学合理地开采浅层地温能资源, 优化地源热泵技术的工程应用, 保证浅层地温能资源的可持续利用, 对可开采资源量进行调查评价显得十分重要。以位于苏北平原中心位置的某县中心城区为例, 展开浅层地温能可开采资源量的评价, 以探讨平原区地下水式和地理管式地源热泵 2 种不同开采方式下, 浅层地温能的可开采资源量的评价方法, 以便更科学、合理地评价资源, 为开发利用浅层地温能资源提供规划、设计及施工依据。

1 浅层地温能可开采资源量评价方法

目前,对于浅层地温能可开采资源量的评价主要从地下水式及地埋管式地源热泵 2 个方面展开,

针对不同的评价内容分别有不同的评价方法。地下水地源热泵系统的开采资源量评价方法主要有水热均衡法及地下水水量折算法;地埋管地源热泵系统的评价方法主要有换热量现场测试法及热传导法(图 1)。

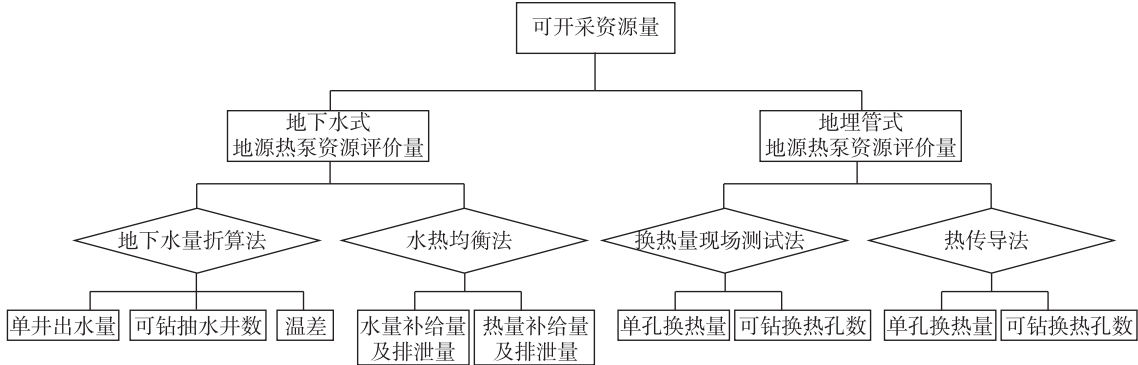


图 1 浅层地温能可开采资源量评价框架图

1.1 地下水地源热泵可开采资源量评价方法

1.1.1 水热均衡法 水热均衡法主要是根据质量守恒及能量守恒来计算评价区的水、热平衡情况,以了解地下水的水量及热储量变化情况。根据《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T 0225—2009),水、热均衡法包括:

水均衡

$$q_{in} = q_{out} + \Delta q \tag{1}$$

式(1)中, q_{in} 为补给量, m^3/d ;包气带中主要包括降水入渗量、灌溉入渗量等,地下水主要包括降水入渗量、灌溉入渗量、渠系入渗量、河流入渗量、侧向补给量、越流补给量等; q_{out} 为排泄量, m^3/d ,包气带中主要包括植物蒸腾量、土面蒸发量、下渗补给地下水的量等;地下水则主要包括潜水蒸发量、人工开采量、侧向排泄量、泉排泄量、河流排泄量、越流排泄量等; Δq 为储存量的变化量, m^3/d 。

热均衡

$$D_{in} = D_{out} + \Delta D \tag{2}$$

式(2)中, D_{in} 为热收入量, kW ;在包气带中主要包括太阳照射热量、大地热流量、地表水向岩土体散发的热量、侧向传导流入的热量等;在地下水中则主要有太阳照射热量、大地热流量、侧向传导流入的热量等;恒温带下,热收入项没有太阳照射热量; D_{out} 为热支出量, kW ;在包气带中主要包括向大气散发的热量、向地表水散发的热量、侧向传导流出的热量等;

在地下水中则主要包括向大气散发的热量、水排泄带走的热量、侧向传导流出的热量等; ΔD 为热储存量的变化量, kW 。

1.1.2 地下水水量折算法 对于地下水地源热泵适宜区浅层地温能可开采资源量的计算,较为常用的是地下水水量折算法,其表达式如下。

$$D_{可} = D_h \times n \times \tau \tag{3}$$

式(3)中, $D_{可}$ 为评价区浅层地温能可开采量(热换功率), kW ; D_h 为单井浅层地温能可开采量(换热功率), kW ; n 为可钻抽水井数; τ 为土地利用系数。

$$D_h = q_w \Delta t \rho_w C_w \times 1.16 \times 10^{-5} \tag{4}$$

式(4)中, D_h 为单井浅层地温能可开采量(换热功率), kW ; q_w 为单井出水量, m^3/d ; Δt 为地下水利用温差, $^{\circ}C$; c_w 为水的比热容, $kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。

水热均衡法偏重于对浅层地温能资源可利用量的保证程度进行评价,此方法需要对地下水、热的长期动态监测数据作为支撑;而地下水水量折算法则能快速准确地反映地下水地源热泵利用浅层地温能的资源量,因此较为常用。

1.2 地埋管地源热泵可开采资源量评价方法

1.2.1 换热量现场测试法 对于已经取得综合传热系数的情况,使用换热量现场测试法来对地埋管地源热泵浅层地温能可开采资源量进行评价较为方便,其表达式如下:

$$D_q = D \times n \times \tau \tag{5}$$

式(5)中, D_q 为评价区浅层地温能可开采资源量(热换功率), kW; D 为单孔换热量, kW; n 为可钻换热孔数; τ 为土地利用系数, 居民点、公共用地和其他用地面积占全部土地面积的比例。开展地埋管热泵工程时, 还要考虑建筑布局、建筑负荷需求、建筑占地面积、资源承载力等因素。

$$D = \lambda_z \div 1\,000 \times \Delta t \times L$$

(6)

式(6)中, λ_z 为综合传热系数, W/(m·℃); 进行换热量现场测试, 计量地埋管换热器的进出水温度、流量, 在热交换达到稳定的条件下, 计算得到钻孔每延米在温度变化 1℃(循环液平均温度与岩土体原始温度比)时的换热量即为岩土体的综合传热系数; Δt 为温差, 即为 U 型管内循环液平均温度与岩土体原始温度之差, ℃; L 为 U 型管地埋管换热孔长度, m。

1.2.2 热传导法 对于已经取得岩土体热导率等参数时, 使用热传导法来计算地温能可利用量则较为方便。没有实测的热导率值时, 可利用前人测定值进行计算, 获取计算区的平均热导率 λ 值, W/(m·K)。在传热及换热达到稳定后, 采用 U 形管进行热交换的单孔地温能可按式近似计算:

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

(7)

式(7)中, λ_1 为地埋管材料的热导率, W/(m·K), 塑料管为 0.42 W/(m·K); λ_2 为钻孔中回填料的热导率, W/(m·K); λ_3 为钻孔周围岩土体的平均热导率, W/(m·K); L 为钻孔有效换热长度, m; r_1 为地埋管束等效半径, m, 单 U 为管内径 1.41 倍, 双 U 为管内径 2 倍; r_2 为地埋管束的等效外径, m, 等效半径 r_1 + 管材壁厚; r_3 为钻孔平均半径, m; r_4 为换热温度影响半径, m; t_1 为地埋管内流体的平均温度; t_4 为温度影响半径之外岩土体的初始温度。

得到单孔地温能后用式(8)可以得出资源量评价区域的总可利用量。

$$D_{\text{可}} = D \times n \times \tau$$

(8)

换热孔一般按网格布置, 布孔间距根据经验确定。

2 评价参数的获取及评价结果

以苏北某县中心城区为例, 进行浅层地温能资源量不同评价方法的对比, 以得出最优的评价方法。

该县中心城区的相关地质勘查资料表明, 100 m 以浅的土层为全新世松散沉积物组成, 为细—粗相间的沉积物, 含水层总厚度在 20 m 左右, 岩性为粉土及细、中砂为主。通过 30 km² 范围内的 10 个现场热响应测试资料及室内测试资料、工程案例, 整理该地区的岩土基本热物性参数, 并进行计算(图 2)。

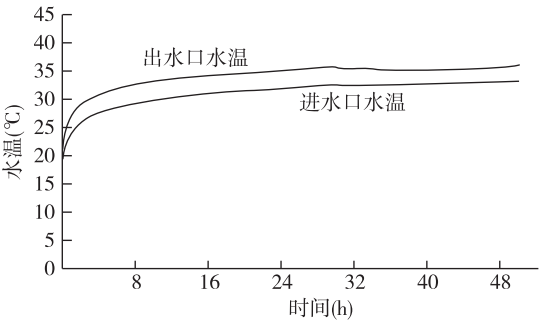


图 2 苏北某县中心城区现场岩土热物性测试典型曲线图

2.1 评价参数的获取

通过分析评价区的取样测试结果, 结合现场实测、研究成果及文献经验来确定浅层地温能资源量计算的基本参数值, 如: 岩土体的比热容、天然密度、天然含水率及孔隙率等。对于岩土体的密度、比热容及孔隙率, 由笔者对评价区内的 10 个现场热响应测试孔各地层的不同热物性参数进行加权平均, 再对每个孔的加权平均值取算术平均值来获得(表 1)。

表 1 苏北某县中心城区浅层地温能资源量计算基本参数值

项目	数值
评价区域面积/km ²	30
绿化率/%	35
含水层/相对隔水层岩土体密度/(kg/m ³)	2.02/2.01
含水层/相对隔水层岩土体比热容/[kJ/(kg·℃)]	1.157/1.345
含水层/相对隔水层岩土体的孔隙率	0.37/0.42
含水层和隔水层总厚度/m	100
地下水单井出水量/(m ³ /d)	500
地埋管夏季综合传热系数/[W/(m·℃)]	3.60
地埋管冬季综合传热系数/[W/(m·℃)]	2.80
钻孔中回填料的热导率/[W/(m·K)]	2.20
钻孔周围岩土体的平均热导率/[W/(m·K)]	1.55
单 U 管内径/m	0.025 6
温度影响半径之外岩土体的初始温度/℃	17.76

对于地下水资源量的评价按 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 为单位区域进行初始参数提取,对于岩土体资源的评价则按 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 为单位区域进行初始参数提取,先计算出单位面积区域的参数值及资源量。

2.2 地下水地源热泵可开采资源量评价

地下水地源热泵适宜区可利用资源量计算有水热均衡法与水量折算法,而水热均衡法需要对地下水、热的长期动态监测数据作为支撑,所需相关的监测周期较长;地下水量折算法则相对易于实现,原理简单,可信度较高。因此,推荐选用地下水量折算法进行地下水式地源热泵可开采资源量的评价计算。

土地利用系数为某一适宜区中居住用地、公共用地和其他用地面积占全部土地面积的比例。苏北某县中心城区浅层地温能评价区域内草地、园地、居民点及工矿用地和未利用土地面积等占土地面积的 34.16% ,而开展地下水地源热泵工程时,还要考虑建筑布局、建筑负荷需求、建筑占地面积、资源承载力、

地下水连通性及城区近远期规划等因素的影响,取土地利用系数为 10.25% ($34.16\% \times 0.3 = 10.25\%$)。

采用公式(3)计算单井换热功率,然后计算单位面积可钻井数,结合土地利用系数计算单位面积可利用量,最后采用公式(4)计算区域可开采利用量(表 3)。

表 2 地下水量折算法计算参数

项目	数值
单井出水量/(m^3/d)	500
地下水利用温差/ $^{\circ}\text{C}$	冬天:5;夏天:10
水密度/(kg/m^3)	1 000
水的比热容/[$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$]	4.18
单位面积可钻井数/(个/ km^2)	4
土地利用系数/%	10.25
计算时间/(d/a)	120

表 3 苏北某县中心城区地下水地源热泵可利用量

季节	区域面积/ km^2	评价区浅层地温能可开采量/ kW	单井浅层地温能可开采量/ kW	可钻抽水井数	土地利用系数/%	单井出水量/(m^3/d)	地下水利用温差/ $^{\circ}\text{C}$	评价区浅层地温能可开采量/ kJ
夏季	30	298 1.5	242.4	120	10.2	500	10	3.1×10^{10}
冬季	30	149 0.8	121.2	120	10.2	500	5	1.5×10^{10}

2.3 地埋管地源热泵可开采资源量评价

地埋管适宜区地源热泵可开采资源量的评价方法有现场测试法及热传导法来分别计算。岩土体的热物性参数汇总在表中(表 4)。

表 4 苏北某县中心城区岩土体计算参数

项目	数值
单孔平均有效换热长度 L/m	100
温差 $\Delta t/^{\circ}\text{C}$	冬天:5;夏天:10
	粉土 1.600
	黏土 1.432
热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	粉砂 1.475
	中砂 1.341
	粉土夹粉砂 1.633
U 形管外半径的 2 倍 r_1/mm	30 或 40
影响范围半径 r_2/m	5

续表 4

项目	数值
单位面积可钻孔数 $n/(\text{个}/100\text{ m}^2)$	4
土地利用系数 $\tau/\%$	10.25
评价区可钻换热孔总数/个	122 979
地埋管材料热导率/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	0.42
钻孔回填料热导率/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	2.20
钻孔周围岩土体平均热导率/[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	1.55
U 型管地埋管换热孔长度/ m	100
地埋管束等效半径/ m	0.018
地埋管束等效外径/ m	0.021
钻孔平均半径/ m	0.07
换热温度影响半径/ m	2.5
温度影响半径外岩土体初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	17.76
夏季综合传热系数/[$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$]	3.60
冬季综合传热系数/[$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$]	2.80

2.3.1 换热量现场测试法评价结果 结合获取的评价区岩土体的基本热物性参数,以及式(5)、式(6)的计算方法,可得到换热量现场测试法的评价结果(表5)。

表 5 评价区地埋管现场测试法地源热泵可利用量

季节	评价区浅层地温能可开采量/kW	单孔换热量/kW	U形管内循环液平均温度与岩土体原始温度之差/℃	地埋管内流体平均温度/℃
夏季	668 78.25	5.31	14.7	32.5
冬季	432 64.67	3.43	12.3	5.5

2.3.2 热传导法评价结果 首先,利用热传导公式计算单孔换热功率。其次根据井间距确定单位面积可钻孔数,结合土地利用系数及地温能提取系数,即在用孔间距计算理想的单位面积可布井数的基础上乘以土地利用系数和地温能提取系数(参照地温能提取系数),计算单位面积可利用量。最后,计算区域浅层地温能可利用总量。根据已知的苏北某县地质情况,在地埋管地源热泵利用方式下,规划区域内浅层地温能的可利用量(表6)。

表 6 评价区地埋管热传导法地源热泵可利用量

季节	评价区浅层地温能可开采量/kW	单孔换热量/kW	U形管内循环液平均温度与岩土体原始温度之差/℃	地埋管内流体平均温度/℃
夏季	37 750.11	3.00	14.7	32.5
冬季	30 001.12	2.38	12.3	5.5

2.3.3 评价结果分析 根据上述计算结果,并结合苏北地区的实际工程案例,对不同评价方法计算的结果进行分析。

苏北地区的典型地下水地源热泵中央空调系统工程项目:某洗浴中心,空调面积3 000 m²,空调冷负荷300 kW,热负荷240 kW,热水温度50℃;抽水井深160 m,含水层埋深80~120 m,出水量480 m³/d,共2口抽水井,抽水水温17.5℃;此项目建成以来运行良好,根据实际运行工况折算,其单井承担换热负荷量夏季约180 kW,冬季约为94 kW,与可开采量理论计算换热量相比,完全可以满足本项目的实际换热需求。因此,地下水量折算法在平

原区资源量评价中具有很好的精度。

苏北平原地区的典型地埋管地源热泵中央空调系统工程项目:某酒店,空调面积16 000 m²,需全年供应55℃生活热水,空调冷负荷1 900 kW,共400口100 dn32×3地埋管井,井深100 m,初始地温为18.0℃,平均单井承担换热量为5 kW,此实际值与换热量现场测试法评价结果最为接近。因此,换热量现场测试法在平原区资源量评价中与工程实际具有较高的吻合度,可信度较高。

3 结 论

通过对评价区域浅层地温能的理论概算和工程案例对比,得出以下3点结论。

- (1) 对于地下水地源热泵可开采资源量的评价方法,地下水量折算法具有很好的精度及可操作性,易于实现评价。
- (2) 对于地埋管地源热泵可开采资源量的评价方法,换热量现场测试法具有很好的精度及可信性,其原始数据来源可靠,涉及参数较少,精度较高,具有很高的借鉴意义;而热传导法则由于涉及参数较多,其不确定因素较多,增大了计算的误差,在平原区资源评价中应当慎重选用。
- (3) 根据换热量现场测试法冬夏季单井换热量的差异可以看出,在实际工程设计阶段,实际管井数量应当根据夏季、冬季不同的实际换热能力来确定,并且实际换热能力随着利用温差的不同而不同,因此,不应笼统按照井深每单位延米换热量全年恒定来估算,这样会造成较大误差,对于冬夏热平衡策略中的辅助热源的容量选取有较大影响。

以上从具体地质特征与浅层地温能开采利用方式相结合的角度出发,论证了在平原区浅层地温能可开采资源量评价时,不同的开采方式下,需要选用不同的评价方法才能取得较为精确的评价结果,这为平原区特别是苏北平原地区的浅层地温能资源量评价提供了新思路。

参考文献:

DZ/T 0225—2009,浅层地热能勘查评价规范[S].
GB 50366—2005,地源热泵系统工程技术规范[S].
国土资源部. 2007. 浅层地热能——全国地热(浅层地热能)开发利用现场经验交流会论文集[C]. 北京:地质出

版社.

高新宇,范伯元,张宏光,等. 2009. 浅层地温能开发利用对地质环境影响程度的探索性研究[J]. 现代地质, 23(6): 1185 – 1193.

韩再生,冉伟彦. 2007. 城市区浅层地温能评价方法探讨[J]. 城市地质, 2(4):9 – 15.

卫万顺. 2008. 北京浅层地温能资源[M]. 北京:中国大地出版社.

卫万顺,李宁波,冉伟彦,等. 2009. 浅层地温能开发利用中的关键问题研究[J]. 城市地质, 4(3):1 – 5.

王贵玲,刘云,蔺文静,等. 2011. 地下水源热泵应用适宜性评价指标体系研究[J]. 研究探讨, 6(3):6 – 11.

许苗娟,姜媛,谢振华,等. 2009. 基于层次分析法的北京市平原区水源热泵适宜性分区研究[J]. 城市地质, 4(1): 18 – 21.

On evaluation method of safe yield in shallow geothermal energy in northern Jiangsu plain terrains

PENG Yi-ping, PANG Bing-qian, LI Gui, SHI Yun-jie

(Geology and Engineering Company of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: Along with the popularization and application of ground source heat pump technology, as a renewable resource, shallow geothermal energy had got much attention, and the energy resources evaluation affairs on the shallow geothermal had been underway. In lights of the geological characteristics in areas of shallow geothermal energy, the authors studied the safe yield, with emphasis on the introduction of the conventional evaluation methods of shallow geothermal energy exploitation quantity, and analyzed the applicability of the evaluation method under different geological features in northern Jiangsu plain terrains, according to the geological characteristics in the study area and the appropriate evaluation method for groundwater source heat pump exploitation quantity. The authors found that the underground water conversion method and the appropriate evaluation method for the buried tube ground-source heat pump exploitation quantity was just the field test method. It was confirmed that the two methods above could achieve high precision in shallow geothermal energy exploitation quantity evaluation in northern Jiangsu plain terrains.

Keywords: Shallow geothermal energy; Evaluation of renewable resources; Conversion method of the groundwater run off; Field test method for heat transfer; Thermal conductivity method; Northern Jiangsu