

浅层地热能勘查评价

韩再生¹ 冉伟彦² 佟红兵² 刘志明³

(1. 中国地质调查局, 北京 100011; 2. 北京地质勘察技术院, 北京 102218;
3. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要:利用热泵技术开发利用浅层地热能正在快速发展,为了保证浅层地热能的合理开发和可持续发展,必须进行勘查评价。区域浅层地热能调查查明区域浅层地热能资源数量、质量以及分布规律,进行开发利用区划,为浅层地热能可持续利用提供依据。地源热泵工程浅层地热能勘查为地下换热系统提供可靠的利用浅层地热能的依据。浅层地热能利用环境评价和经济评价是勘查中的必要内容。浅层地热能资源计算评价方法是本文首次系统提出的。

关键词:浅层地热能;地源热泵;勘查;评价

中图分类号:P314.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)06-1115-07

1 概述

地热能是地球内部产生的储存在地表以下的热量。浅层地热能是指地表以下一定深度范围内(一般为恒温带至 200 m 埋深),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热能。浅层地热能是地热资源的一部分。浅层地热能是赋存在地球的表层岩土体中的低温地热资源。浅层地热能资源丰富,分布广泛,温度稳定,开发技术臻于成熟,目前已经广泛应用于供暖和空调制冷,是一种很好的替代能源和清洁能源。近 10 年以来,浅层地热能利用技术逐步得到推广,日益受到人们的重视,成为目前地热能利用新的增长点。其分布普遍、埋藏浅、可持续利用,并且可以作为化石能源的替代资源,减少温室气体。中国广大平原松散地层分布区,或具备地下换热条件的基岩出露区,都具有开发利用浅层地热能的条件。北京市应用浅层地热能作为冷、热源的集中采暖、制冷系统,每年以 15%~20% 的速度增长。目前全市采用这种技术的供暖建筑面积已超过 500 万 m²。浅层地热能利用系统具有绿色环保、高效节能、运行成本低、可持续利用、技术成熟、不消耗地下水等特点,应用前景广阔,原则上适用于任何地层和建筑^[1]。目前,全国利用浅层地热能供暖(制冷)面积约为 2000 万 m²,但占整个住宅能耗的比率仍很低,具有进一步加大开发利用的潜力。

开发利用浅层地热能必须以地质勘查评价为基础。对于土壤源换热系统,需要掌握一定区域内地热承载力、地温场

特征、岩土体热传导系数等参数,土壤源换热系统的设计要根据浅层地热资源所赋存的地热地质条件而定。地下水换热系统需要有丰富和稳定的地下水作为保证,水文地质条件必须适合于同层回灌。在建设地下水换热系统时,需要避免不同含水层之间的水质污染、热污染问题的发生。建设地下水换热系统的地下水井应避免地下水源地保护区和地下水严重污染的区域。目前,在建设浅层地热能利用系统前大多数没有开展地热能资源勘查和环境影响评价,从而造成能源利用效率不高,部分浅层地热能利用系统工程出现了明显的环境安全隐患^[2]。

为了保证浅层地热能的合理开发利用,有必要结合地区发展建设和能源需求,进行区域浅层地热能资源调查评价,制定合理开发利用规划,确定有利的开发地段及适宜的开发利用方式,做到有序开发、合理利用、科学管理浅层地热能资源,系统开展区域浅层地热能资源评价,为政府统一规划浅层地热能资源、提高能源利用效率、保障能源安全的宏观决策提供基础依据^[3-4]。

浅层地热能勘查评价的目的是为利用与保护浅层地热能资源,提供资源/储量及其所必须的地质资料,减少开发风险,取得浅层地热能资源开发利用最大的社会效益和环境效益,并保持资源的可持续利用。浅层地热能勘查的主要任务是采用综合勘查方法技术查明地热地质背景及浅层地热能条件,确定可开发的地区及合理开发量,对浅层地热能综合利用进行评价,提出可持续开发利用的建议,并预测开发利用

收稿日期:2007-03-19;改回日期:2007-07-15

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010634107)资助。

作者简介:韩再生,1948 年生,男,研究员,长期从事水文地质、环境地质勘查、研究、教学和管理工作的;E-mail:hzaisheng@mail.cgs.gov.cn。

产生的环境影响。浅层地热能勘查分为区域浅层地热能调查和浅层地热能利用系统工程勘查两类。

2 区域浅层地热能调查

区域浅层地热能调查的目的是查明区域浅层地热能资源数量、质量以及分布规律,进行开发利用区划,为浅层地热能可持续利用提供依据。浅层地热能调查评价的范围一般按照行政区或自然单元,根据当地对浅层地热能资源利用与管理的需要确定。

区域浅层地热能调查应在充分利用现有水文地质、工程地质等资料的基础上,补充岩土体热物性、水文地质、工程地质工作,进行钻探和试验。在调查工作实施之前,必须进行充分的前期论证工作,按要求编写设计书。设计书的主要内容应包括:目的、任务、地理概况、区域地质、水文地质和工程地质条件、研究程度及存在主要问题、工作布置及工作量、技术路线、浅层地热能资源计算与评价方法、人员组成、设备、工作计划、试验及钻探施工设计、经费预算、预期成果和提交报告时间等。

应充分利用现有的水文地质、工程地质勘查成果,基本查明区域地热地质、水文地质、工程地质条件;基本查明含水层结构、厚度、埋藏等;基本查明地下水水位分布、水量、水质情况及其动态变化;基本查明包气带岩土体结构等。根据已有实测数据或经验数据,补充必要的调查取样、钻探坑探、槽探、钻探或岩土体热物性试验等工作,确定未知岩土体的热物理参数(热导率和比热)。通过地温调查工作(即采取坑探、槽探或钻探手段测量地温),基本查明地温分布、水温分布及其动态,确定恒温带的温度和深度、大地热流值,并在冻土地区,确定冻土层厚度。确定岩土体的孔隙率(裂隙率)、含水量、密度等物理性质参数。选择代表性地段进行回灌试验,初步评价含水层的回灌能力并求取渗透系数。基本查明浅层地热能的热来源和热成因机制,基本查明地下水水热的补给、运移、排泄条件,基本查明包气带地热能的补给、运移和排泄条件,提出浅层地热能形成的概念模型和理论参数模型。应选择若干代表性地段建立简易的地温试验点,岩性及结构应具有区域代表性和完备性,并坚持长期监测。地温场试验监测项目应包括地温、土壤含水量、土壤水势和气温等,监测时间应在一个水文年以上。地温调查采用槽探、坑探或钻探等测量地温,测试岩土体的热物理参数。回灌试验应准确测定回灌井的回灌量、压力(水位)随时间的变化、回灌影响范围及影响区内地下水温度、压力(水位)和化学组分变化等,为确定合理回灌方案提供依据。回灌应为同层回灌,一般宜采用单井回灌试验,有条件的地区,也可进行对井回灌试验。回灌时间不少于4个月(不含恢复观测时间)。回灌方式分为真空回灌、自流回灌和加压回灌3种类型。一般采用自流回灌方式进行。回灌试验应布设一定数量的观测井,试验前应实测回灌井和观测井的地下水温度、压力(水位)及化学组

分;试验期间(包括回灌期间及恢复期间)应定期监测其变化并分析这些变化与灌(采)量变化的关系,直至相对稳定。

原位热传导试验是指采用人工冷(热)源对岩土体的热传导性能进行探测的一种试验。原位热传导试验分为单孔热传导试验和群孔热传导试验。群孔热传导试验一般由一个主孔和一个以上的观测孔组成。原位热传导试验应实测冷(热)源和观测孔的温度、压力(水位)或流量等变化,确定不同温度不同压力(或流量)的冷(热)源的影响范围及影响区内的温度、压力(水位)或流量的变化。输入的冷(热)量应大到足以在观测孔中观测到温度、压力(水位)或流量等的变化,且试验时间不少于30d或直至温度、压力(水位)变化相对稳定。探求冷(热)源的温度、冷(热)量与影响范围以及影响区内的温度、压力(水位)或流量变化的关系,并采用数值法或解析法计算热导率或热扩散率。推荐采用数值法再现原位热传导试验过程。

区域浅层地热能调查应计算评价浅层地热能可开采量和地热能储量。浅层地热能可开采量宜采用热流量法计算。实测或引用所在地热地质单元的大地热流值,合理圈定区域内适宜开发利用浅层地热能的土地面积,选用本区域实测或地热地质条件类似地区的浅层地热能可利用系数,计算可持续利用的本区域浅层地热能可开采量。在条件适宜的区域可采用地下水折算法评价浅层地热能可开采量。地下水循环利用量为计算区域内可用于提取地热能的地下水开采量。

地热能储量宜采用热储法计算。储量评价的深度范围为在恒温带以下至200m埋深以内。利用温差为当地适宜利用值。计算面积为适宜开发利用浅层地热能的土地面积。

当具备可靠的地热能评价成果的条件下,在浅层地热地质条件类似地区可采用比拟法评价浅层地热能可开采量和地热能储量。

大地热流值采用恒温带以下的地温数据和热导率数据进行计算^[9]。充分利用前人测定和公布的一些地区的大地热流值,并注意其值在深度上和区域上的代表性。如果没有实测的大地热流值,则利用地温实测数据和热导率测试数据按公式 $q=\lambda G$,即大地热流值=热导率×地温梯度进行计算。大地热流值单位为 mW/m^2 或HFU,1HFU=41.86 mW/m^2 。

针对地源热泵的应用,对浅层地热资源区域开发和利用进行合理区划。区划应按地下水换热系统、土壤源换热系统两种开发利用方式进行适宜性分区,其适宜性分区分为:适宜区和不适宜区,根据经济技术条件、地质条件、水文地质条件、工程地质条件和开发利用需求综合评定划分。应根据适宜区分区确定浅层地热资源的评价方法、评价面积和计算参数,且只计算适宜区的资源量。评价面积应扣除建筑、道路等不宜进行地下换热工程的占地面积。对于占用农田耕地取热应进行专门的生态环境影响评价后,才能划定适宜区。区域浅层地热能调查成果,为浅层地热能开发规划和地源热泵工程勘查提供依据。

3 地源热泵(地下换热系统)工程浅层地热能勘查

勘查的目的是为地下换热系统提供可靠的利用浅层地热能依据。地下换热系统工程浅层地热能勘查范围的确定需要综合考虑地质条件、地热地质条件和建筑工程需求,勘查范围应大于拟定换热区。

首先应该调查收集已有的地热地质、工程地质、水文地质、水井、勘探孔及当地地温、气象、水文及冻土层资料。调查场地空间状况及浅层地热能资源开发利用条件,选择适宜的地下换热系统。

为了查明场地水文地质条件或岩土体的性质和分布,需要钻探、采取岩土试样或进行原位热传导试验时,可采用钻探、井探和地球物理勘探等。勘探方法的选取应符合勘查目的和岩土体的特性。布置勘查工作时应考虑勘查过程对工程和自然环境的影响,防止对地下管线、地下工程和自然环境的破坏。钻孔、坑探、钎探和探槽完工后应妥善回填。

土壤源换热系统浅层地热能勘查应在地下换热系统方案设计前进行,对工程场区岩土体中浅层地热能条件进行勘查。土壤源换热系统浅层地热能勘查其主要工作内容应符合下列规定:查明场地岩土层的岩性、结构、地下水赋存状况。查明岩土层的导热性能、换热效率、导热系数、温度,确定恒温带的深度和温度。冻土地区,应查明冻土层厚度。查明场地岩土体的含水率、密度、比热、导热系数、温度。提供满足设计施工所需的热物性参数,确定岩土层换热能力,预测浅层地热能换热量。若条件许可,则应确定不同换热量对地温场的影响,提出埋管方式、施工方案的建议。

场地较小,且场地条件简单的工程,场地或其附近已有岩土层热物性资料时,可根据实际情况直接引用现有资料,无需进行施工勘查。场地地形地貌复杂,岩土种类较多,不均匀,性质变化较大时,应增加取土数量或现场测试工作量。

勘查现场原位热传导试验布置应符合下列要求:采用水平埋管换热器时,工程场地勘查采用槽探、坑探或钎探进行。探槽应根据场地形状确定,探槽的深度一般超过埋管深度1 m。采用竖直埋管换热器时,工程场地勘查采用钻探进行,钻孔深度应比设计最深的热交换器至少深5 m。进行现场测试点的数量应根据岩土层结构、均匀性和设计要求确定。竖直埋管换热系统供给建筑面积小于3000 m²时,应至少布置1个钻孔;大于3000 m²建筑面积时,每增大5000 m²建筑面积应增加布置1个钻孔。水平埋管换热系统供给10000 m²建筑面积时,应至少挖4个探槽;供给建筑面积大于20000 m²时,应至少每10000 m²挖2个探槽。勘探孔结构的设计,应根据勘查区的地质特性、测试要求及钻探工艺等因素综合考虑,以能满足获取当地的热物性参数为宜,并宜尽量简化。

原位热传导试验是在已钻好的钻孔中埋设导管并按设计要求回填,该钻孔中的导管将来可以作为地热换热器的一

个支路使用,在回路中充满水,让水在回路中循环流动,自某一时起对水连续加热相当长的时间(数天),并测量加热功率、回路中水的流量和水的温度及其所对应的时间,最后再根据已知的数据推算出钻孔周围岩土的平均热物性参数——岩土体导热系数。试验时,应首先做没有加热的测试,获取地层初始温度。加热功率变化的次数根据试验目的确定,应至少为2次;每一加热功率下,应至少改变流量2次。试验时间在60 h左右。每次热传导试验应做停止加热的地温恢复试验。试验一般应在测试埋管安装完毕72 h后进行。

原位热传导试验的仪器设备应定期检验和标定。分析试验成果资料时,应注意试验条件如温度等对试验的影响,剔除异常数据。有条件情况下,应在试验孔周围布置观测孔。

采取土体试样应符合下列要求:采样点的数量应根据岩土层结构、均匀性和设计要求确定。每一场地每一主要土层的原状土试样不宜少于1件(组)。采取的土体试样应为原状土样。

地下水换热系统方案设计前,应对工程场区的水文地质条件进行勘查。地下水换热系统浅层地热能勘查的主要内容包括:查明工程场地地质、水文地质条件,取得有关水文地质参数和评价地下水资源所需的数据。水文地质条件勘查内容对应不同场地条件、工程要求参照《供水水文地质勘察规范》(GB50027)。要查明工程场地回灌能力。在同层回灌条件下,查明回灌水温度对地温场的影响。提供满足设计施工所需的最大系统循环水量,确定抽灌井的数量和布局。

工程场地及其附近已有详细的水文地质资料,能够满足系统建设运行所需的地质、水文地质回灌能力等资料时,可根据实际情况,直接引用现有资料进行系统设计。地下水换热系统供给建筑面积小于3000 m²时,应至少布置1个勘探孔;供给建筑面积大于3000 m²建筑面积时,每增大5000 m²建筑面积应增加布置1个钻孔。勘探孔的深度,宜钻穿有供水意义的主要含水层(带)或含水构造带;勘探孔的结构设计和施工、抽水试验和回灌试验可参照《供水水文地质勘察规范》(GB50027)、《供水管井技术规范》(GB50296)的有关内容。通过回灌试验确定合理的回灌方式和回灌频率。回灌水质应优于或等于原地下水水质,含砂量不应超过1/50000,必须在进行水质验证之后再回灌试验。回灌水位上升幅度不宜超过5 m。

地下水换热系统浅层地热能计算

$$D = mc\rho\Delta T \times 2.78 \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中: D ——地下水地热能利用量(kW);

m ——地下水循环量(m³/h);

c ——水的比热容(kJ/kg·°C);

ρ ——水的密度(kg/m³)

ΔT ——水的温差(°C)。

地下水质量评价,水试样应同时采取抽水水样和回灌水样。水试样应及时试验,清洁水放置时间不超过72 h,稍受污染的水不宜超过48 h,受污染的水不宜超过12 h。水质参照《地下水质量标准》GB/T14848-93进行评价。对水和土的腐

蚀性参照《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)中有关内容进行评价。

对所有勘查资料进行系统的、综合的整理与分析研究,特别是要加强多年资料的分析整理,综合研究各种资料间的内在联系,及时编制各种图表。对原始资料应分类整理,及时提交相应的报告。

4 浅层地热能资源计算评价

浅层地热能资源评价包括地热能资源量评价和地下水质量评价两部分。浅层地热能资源评价应计算浅层地热能可利用量和储存量。区域浅层地热能评价的深度范围为:在恒温带以下至 200 m 埋深以内。地源热泵工程浅层地热能评价的深度根据工程的需求而定。浅层地热能资源一般利用温差在 5~15℃,地下水利用后的温度应在 0℃以上。在中国不同地区,可利用温差也不相同。推荐采用值为:东北地区可用 5~6℃,华北地区可用 7~8℃,华东地区可用 8~9℃,华南地区可用 10~12℃。

区域浅层地热能资源评价应在完整的地热系统分析研究的基础上,以地热地质单元为基本计算单元进行。研究热(或水热)的补给、运移和排泄规律,研究地热能成因、热传导方式以及地温场特征,建立地热能形成的概念模型和数学模型。计算模型应符合实际,所选择的计算方法和计算参数合理且符合各勘查阶段的要求,模型的建立和计算方法的采用,应随着勘查程度的提高进行修正和更新。随着勘查程度的提高,可利用数值法建立浅层地热能的管理模型,提出浅层地热能的可持续开发利用方案和管理措施。

区域地热能资源量评价采用热流量法。根据大地热流计算浅层地热能可利用量。公式为:

$$Q_h = aqM \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中:

Q_h —浅层地热能可利用量, kW;

a —浅层地热能可利用系数;

q —大地热流值, mW/m²。

M —计算面积, m²

浅层地热能可利用系数 a 为单位面积浅层地热能可利用量与大地热流值之比。该系数与当地的水文地质和地热地质条件有关,浅层地热能可利用系数应根据经开采验证的浅层地热能利用系统中实测的单位面积提取利用的热流量与当地实测大地热流值的比值取得,可用于地热地质条件类似区域浅层地热能可利用量的评价。

计算得出的浅层地热能可利用量是在采暖期的利用热量,在一个水文年达到热均衡的条件下,该热量是可持续利用的。大地热流值 q 应按照技术要求测定。

采用热储法计算评价地热能储存量。在包气带和含水层中,热储法计算地热能储存量的表达式分别如下:

在包气带中地热能储存量按下式计算:

$$Q_R = Q_S + Q_W + Q_A \quad (3)$$

式中: Q_R —地热能储存总量, kJ, (1kcal= 4.1868kJ); Q_S —岩土体中的热储存量, kJ; Q_W —岩土体所含水中的热储存量, kJ; Q_A —岩土体中所含空气中的热储存量, kJ。

$$\text{其中: } Q_S = \rho_s C_s (1 - \varphi) M d \Delta T \quad (4)$$

式中: ρ_s —岩土体密度, kg/m³; C_s —岩土体比热容, kJ/kg·°C; φ —岩土体的孔隙率(或裂隙率); M —计算面积, m²; d —计算厚度, m; ΔT —利用温差, °C。

$$Q_W = \rho_w C_w \omega M d \Delta T \quad (5)$$

式中: ρ_w —水密度, kg/m³; C_w —水比热容, kJ/kg·°C; ω —岩土体的含水量。

$$Q_A = \rho_A C_A (\varphi - \omega) M d \Delta T \quad (6)$$

式中: ρ_w —空气密度, kg/m³; C_w —空气比热容, kJ/kg·°C。

在含水层和相对隔水层中,地热能储存量按下式计算:

$$Q_R = Q_S + Q_W \quad (7)$$

式中:

Q_R —地热能储存总量, kJ;

Q_S —岩土体中的热储存量, kJ;

Q_W —岩土体所含水中的热储存量, kJ。

其中, Q_S 的计算公式同(4)式, Q_W 的计算公式如下:

$$Q_W = \rho_w C_w \varphi M d \Delta T \quad (8)$$

d 为地下水面至计算下限的岩土体厚度, 包括需要计算的含水层和相对隔水层。

热储法不仅适用于松散岩层分布区的地热能储存量评价,而且同样适用于基岩地区的地热能储存量评价,故凡是条件具备的地区,均应采用此方法评价地热能储存量。

热导率计算法适用于取得实测热导率等参数后,计算土壤源换热系统的地热能可利用量。如果没有实测的热导率值,则可利用前人测定和公布的一些地区的热流值和地温梯度值进行计算,得到计算区的综合热导率 λ 值(W/m·°C)。在以传导方式进行热传递和热交换达到稳定的条件下,采用 U 形管进行热交换的单孔地热能可按以下公式近似计算:

$$D = \frac{\Delta T}{R} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (9)$$

式中:

D —单孔地热能(W);

ΔT —温差(°C),即为 U 形管内温度平均值与 r_2 处岩土体温度之差;

R —导热热阻(°C/W);

λ —热导率(W/m·°C);

L —单孔 U 形管有效热交换长度(m),若热交换孔钻 200 m 深,扣除浅表 10 m 太阳能影响的深度,则 U 形管的有效热交换长度为 190 m;

r_2, r_1 —分别为影响范围半径和 U 形管等效外半径, r_1 为 U 形管外半径的 $\sqrt{2}$ 倍。

上式中 $\Delta T, r_2, r_1$ 的值可根据土壤源换热系统实例实测

或经验获取,这样就得到单孔地热能,然后乘以区域可钻孔数,即得评价区(地源热泵工程区)的总地热能(W)。钻孔一般按网格布置,布孔间距根据经验确定,若按常规(平均)情况以5 m×5 m网格布置热交换孔,则可钻孔数=有效面积(有效面积为扣除建筑和道路等占地的评价区域面积,一般情况不在建筑物覆盖和道路下钻孔)÷25 m²。

地下水量折算法适用于地下水地源热泵的地热能可利用量的计算,计算公式如下:

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

式中: Q_h —地热能可利用量, kW; q_w —地下水循环利用量, m³/d;

ΔT —地下水利用温差(°C)。

此方法对地下水地源热泵工程浅层地热能资源可利用量的计算结果是准确的。

水热均衡法主要通过研究区的水、热均衡计算,了解地下水的水、热储存量和水、热补排情况。

水均衡 $q_{\text{win}} = q_{\text{wout}} + \Delta q_w$ (11)

式中: q_{win} —补给量, m³/d

Q_{wout} —排泄量, m³/d

Δq_w —储存量的变化量, m³/d

在包气带,土壤水分的补给项有:降水入渗量、灌溉入渗量等;排泄项有:植物蒸腾量、土面蒸发量、下渗补给地下水的量等。

地下水补给项有: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;排泄项有: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。

热均衡 $Q_m = Q_{\text{out}} + \Delta Q$ (12)

式中: Q_m —热收入量, kW; Q_{out} —热支出量, kW; ΔQ —热储存量的变化量, kW。

在包气带,热的收入项有:太阳照射热量、大地热流量、地表水(泉)向土壤散发的热量,侧向传导流入的热量等;支出项有:向大气散发的热量、向地表水(泉)散发的热量、侧向传导流出的热量等。

在地下水中,热的收入项有:太阳照射热量、大地热流量、水补给带来的热量、侧向传导流入的热量等;支出项有: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。

这种方法需要有长期动态监测数据的支撑,适用于评价地热能资源可利用量的保证程度。在调查评价时,须注意查明各均衡项情况。恒温带以下,热收入项中没有太阳照射热量。

类比法利用已知地区的地热能热资源量来推算地热地质、水文地质条件相似的未知地区的地热能源量。此方法适用于浅层地热能可利用量和储存量的估算。

数值法适用于浅层地热利用系统取得了实测的热物理参数和水文地质参数后应用,既适用于地热能资源储存量的计算,也适用于地热能资源可利用量的计算。这种方法需要

有长期动态监测数据的支撑。

地下水质量评价的目的是在查明地下水的物理性质、化学成分及其变化规律的基础上,结合浅层地热能利用技术,根据中国现行的《地下水质量标准》(GB/T 14848-93)进行评价。

浅层地热能利用系统中热泵机组对地下水水质的基本要求是:澄清、水质稳定、不腐蚀、不滋生微生物或生物、不结垢、不阻塞等。地下水对热泵机组的有害成分有:铁、锰、钙、镁、二氧化碳、溶解氧、氯离子、酸碱度等。地下水地源热泵水质要求可采用《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019)中热泵机组用地下水水质标准。

应对地下水中由于 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 等的存在导致对金属(如铜)和碳钢的腐蚀性作出评价。另外,地下水对管线和设施的腐蚀影响,一般应在工程中,通过试验(最基本的试验是挂片试验)作出评价,确定不同材料的腐蚀率。可参照工业上用腐蚀系数来衡量地下水的腐蚀性,具体评价方法如下:

若腐蚀系数 $K_k > 0$,称为腐蚀性水;

腐蚀系数 $K_k < 0$,并且 $K_k + 0.0503 \text{Ca}^{2+} > 0$,称为半腐蚀性水;

腐蚀系数 $K_k < 0$,并且 $K_k + 0.0503 \text{Ca}^{2+} < 0$,称为非腐蚀性水;

腐蚀性系数的计算:

对酸性水 $K_k = 1.008 (\text{rH}^+ + \text{rAl}^{3+} + \text{rFe}^{2+} + \text{rMg}^{2+} + \text{rHCO}_3^- - \text{rCO}_3^{2-})$;

对碱性水 $K_k = 1.008 (\text{rMg}^{2+} - \text{rHCO}_3^-)$;

式中 r 是表示离子含量的每升毫克当量(毫摩尔)数。

地下水中的钙盐是造成空调系统结垢的主要成分。对地热水体中所含钙、镁和铁等组分产生结垢的可能性作出评价,评述结垢程度。对结垢较严重的地下水,在工程中还应做防垢试验,提出较为经济合理的解决办法。可参照工业用锅垢总量来衡量地下水的结垢性,具体评价方法如下:

若锅垢总量 $H_0 < 125$,称为锅垢很少的地下水;

锅垢总量 $H_0 = 125 \sim 250$,称为锅垢少的地下水;

锅垢总量 $H_0 = 250 (\sim 500)$,称为锅垢多的地下水;

锅垢总量 $H_0 > 500$,称为锅垢很多的地下水。

锅垢总量的计算:

$$H_0 = S + C + 36\text{rFe}^{2+} + 17\text{rAl}^{3+} + 20\text{rMg}^{2+} + 59\text{rCa}^{2+}$$

式中:

S —地热流体中的悬浮物含量(mg/L);

C —胶体含量 $C = \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (mg/L);

r —表示离子含量的每升毫克当量数。

对氯离子含量高(超过25%摩尔当量)的地下水,可采用拉申指数(LARSON)判断碳酸钙的结垢趋势。拉申指数“ Li ”按下式计算:

$$Li = \frac{\text{Cl} + \text{SO}_4}{\text{ALK}} \quad (13)$$

式中:

Cl —氯化物或卤化物浓度;

SO_4 —硫酸盐浓度;

ALK—总碱度。

三项均以等当量的 CaCO_3 (mg/L)表示。

当 $Li > 0.5$, 不结垢; $Li < 0.5$, 可能结垢。

5 浅层地热能利用环境评价

浅层地热能是一种清洁能源。浅层地热能勘查中,在查明浅层地热能资源的基础上,应根据所选用的开采利用方案对浅层地热能利用系统工程建设和运行对环境的影响进行评价。基本任务是评价和预测系统建设运行可能造成的环境正、负效应。提出促进环境改善、防止环境地质问题的对策,保护环境,为建设项目选址决策、工程设计和地质环境的管理提供科学依据。浅层地热能利用环境影响评价的范围以能够满足保护地质环境的需要为原则,应依据浅层地热能利用系统的性质、工程规模、布局、生产工艺并结合当地环境、地质条件等因素综合分析确定。在对评价范围内地质环境现状调查的基础上,评价下列内容:对浅层地热能利用对大气环境的影响;地下水换热系统对浅层地下水的影响;排放流体中化学成分对地下水环境的影响;能否产生地面沉降、岩溶塌陷和地裂缝;土壤源换热系统循环水泄漏对地下水质的影响,特别要评价浅层地热能开发对浅层地温场的影响。在环境评价的基础上,提出防止开发浅层地热能负面影响的措施。

浅层地热能开发环境影响评价的工作程序包括:收集整理历史资料,建立环境影响评价指标体系。根据浅层地热能相关流体的性质、质量、温度及储存空间按工程要求对流体环境进行评价。设立观测点,采集水质、水位及温度等系统资料。分阶段进行环境影响评价。建立环境预测模型及获取模型相关参数,校正模型并用其进行浅层地热能利用环境影响评价。

大气环境影响评价应对工程在减少大气污染、清洁环境方面的效应做出评价。包括:减少排放燃烧产物的估算,如二氧化硫的排放量、氮氧化物排放量、二氧化碳排放量、煤尘排放量等,地下水环境影响评价应依据浅层地热能系统运行过程中循环水质的变化,对地下水质量现状做出评价。回灌到原含水层中的水质不应有明显的变化。地质环境影响评价应针对浅层地热能利用过程中能否产生地面沉降、岩溶塌陷和地裂缝等地质环境问题做出评价。热污染评价应按在一个水文年内取热层保持地温平衡为原则进行评价,不影响相邻地区浅层地热开发。放射性污染评价可参照放射性保护规定进行。其他环境影响评价可包括:地源热泵工程是否引起的原有地质景观的变化等。在环境现状调查、评价基础上,对大气环境、地下水环境和地质环境影响程度和范围进行预测,为浅层地热能开发提供科学依据。

地热开发利用不能只考虑人类眼前对能源的需求,人类赖以生存的生态系统对这种能源的基本需求,可以称做“生态基热”。从目前的有限研究成果看,大地热流低于 57 mW/m^2 的区域,生态系统比较脆弱,如果人类再从这些区域以采暖的方式开发地热的话,将可能要冒着加剧当地生态退化的

风险。但是将这种区域作为冷源开发制冷系统,将地表多余的热传入地下,则有可能改善当地的生态环境。因此,可以开发地热采暖的地区,应该是大地热流高于 57 mW/m^2 的区域,地热的可开采量应该以保障当地生态环境所依托的区域大地热流不低于 57 mW/m^2 为前提^[9]。

6 浅层地热能利用经济评价

在地源热泵工程浅层地热能勘查中应进行经济评价。内容包括:投资估算、运行费用估算、收益估算和效益评估。

地源热泵工程包括机房设备系统、室外换热系统和室内空调末端系统 3 部分组成。其中:机房设备系统包括地源热泵机组、电器自动控制装置、循环泵组、全自动定压仪、软化水与补水系统装置和机房附属设备、管线、阀门等及安装。室外换热系统包括钻孔、换热管安装和换热地到机房地面联络管线等及安装。室内空调末端系统包括室内管道、风道、风机盘管等及安装。投资主要包括土建工程费用、泵房设备费、钻孔费用、前期论证费(设计费、监理费等)等。

运行费用估算要计算维持系统正常运行所需的各项费用。实际运行费 = (消耗电量 × 单位电费) + 其他实际费用。消耗电量包括循环泵耗电量、水源泵耗电量、补水泵耗电量、潜水泵耗电量等。其他费用包括:维修费、大修费、人工费、管理费等。

收入计算根据建筑面积计算出供暖与供冷面积。采暖费和供冷费按当地取费标准计算,计算出每年应收取的总采暖费用和总供冷费用。

效益评估根据工程项目初投资和运行费用,采用现金流量表法计算出静态和动态投资回收期。同时,还应计算出投资项目的财务内部收益率、财务净现值与净现值率等经济性参数。全面评估工程项目的投资收益。效益对比根据当地油、气、煤等价格,分别估算燃气锅炉供暖、燃煤锅炉供暖和燃油锅炉供暖的初投资和年运行成本,并与浅层地热能利用地源热泵工程供暖与供冷的总成本进行效益对比。

参考文献(References):

- [1] 中国建筑科学院主编. 地源热泵系统工程技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Academy of Structure Sciences. Technical Code for Ground-Source Heat Pump System[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005(in Chinese).
- [2] 国土资源部. 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, 2007.
Ministry of Land and Resources. Shallow Geothermal Energy - Proceedings of National Symposium on Development and Utilization of Shallow Geothermal Energy[C]//Beijing: Geological Publishing House, 2007(in Chinese).
- [3] 朱家玲, 等. 地热能开发与应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
Zhu Jialing, et al. Technique on Geothermal Energy Development

- and Utilization [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2006 (in Chinese).
- [4] 汪集旸, 马伟斌, 龚宇烈. 地热利用技术—可再生能源丛书[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- Wang Jiyang, Ma Weibin, Gong Yulie. Techniques of Geothermal Usage [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [5] 汪洋. 应用大地热流和地下流体氦同位素组成资料计算中国大陆地壳生热元素丰度[J]. 中国地质, 2006, 33(4):920-927.
- Wang Yang. Radioactive heat-producing element abundance in the crust of continental China estimated from terrestrial heat flow and the helium isotopic composition of underground fluids [J]. Geology in China, 2006, 33 (4):920-927 (in Chinese with English abstract).
- [6] 匡耀求, 黄宁生, 朱照宇, 等. 试论大地热流对地表环境与生态演变的影响[J]. 中国地质, 2002, 29(1):86-95.
- Kuang Yaoqiu, Huang Ningsheng, Zhu Zhaoyu, et al. Influence of the terrestrial heat flow on the evolution of the surface ecosystem and environment [J]. Geology in China, 2002, 29 (1):86-95 (in Chinese with English abstract).

Exploration and evaluation of shallow geothermal energy

HAN Zai-sheng¹, RAN Wei-yan², TONG Hong-bing², LIU Zhi-ming²

(1. China Geological Bureau, Beijing 100011, China; 2. Beijing Institute of Geological Exploration Technology, Beijing 102218, China;

3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 050803, Hebei, China)

Abstract: The exploitation and utilization of shallow geothermal energy by using the heat pump technology are developing quickly. In order to ensure the rational and sustainable development of shallow geothermal energy, exploration and evaluation are necessary. Through regional survey of shallow geothermal energy, we can ascertain the quantity, quality and distribution of regional geothermal energy at shallow depths to work out a plan for its exploitation and utilization, thus providing a basis for sustainable use of shallow geothermal energy. Exploration of shallow geothermal energy for the ground source heat pump project can offer a reliable basis for the use of shallow geothermal energy for the underground heat exchange system. The environmental evaluation and economical evaluation are the essential content during the exploration. The methods for calculation and assessments of shallow geothermal energy are for the first time put forward systematically in this paper.

Key words: shallow geothermal energy; ground-source heat pump; exploration; assessment

About the first author: HAN Zai-sheng, male, born in 1948, senior researcher, mainly engages in hydrogeology and environmental geology investigation, research, teaching and management; E-mail: hzaisheng@mail.cgs.gov.cn.